

**ANÁLISIS DE PREFACTIBILIDAD DE LAS ALTERNATIVAS DE
ABASTECIMIENTO HIDRICO DE LA UNIVERSIDAD DE LA COSTA CUC**

SHARON FERNÁNDEZ ZAPATA

DANIELA ISABEL NIETO PERALTA

**CORPORACIÓN UNIVERSIDAD DE LA COSTA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
INGENIERÍA AMBIENTAL
BARRANQUILLA, COLOMBIA**

2019

**ANÁLISIS DE PREFACTIBILIDAD DE LAS ALTERNATIVAS DE
ABASTECIMIENTO HIDRICO DE LA UNIVERSIDAD DE LA COSTA**

SHARON FERNÁNDEZ ZAPATA

DANIELA ISABEL NIETO PERALTA

Director

JORGE ENRIQUE CALDERON MADERO

Codirector

ERIKA BLANCO

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de

Ingeniero Ambiental

CORPORACIÓN UNIVERSIDAD DE LA COSTA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

INGENIERÍA AMBIENTAL

BARRANQUILLA, COLOMBIA

2019

Barranquilla,

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Dedicatoria

A Dios por ser mi guía, quien me llenó de entendimiento, fortaleza y sabiduría para elaborar el presente trabajo y afrontar todas las adversidades que se presentaron.

A mi madre Raquel Zapata, quien me impulsó a dar lo mejor de mí y me apoyo en el recorrido de este camino hasta lograrlo con éxito. Gracias mamá por guiarme a ser quien soy.

A mi compañera Daniela Nieto por ser mi apoyo en todo momento y compartir sus conocimientos e ideas para desarrollar este trabajo con gran éxito hasta el final.

Sharon Fernández Zapata

Dedicatoria

A Dios por ser mi guía, líder y razón de ser.

A mis padres Edicta y Fernando por su apoyo incondicional, por creer en mí, porque me han forjado mi camino, sin su ayuda no estaría donde estoy. Por ustedes hoy soy quien soy y por eso mi triunfo es para ustedes.

A mi amada abuela Ana por su calidad de tiempo para escucharme, aconsejarme y acompañarme en mis triunfos y dificultades.

A mi hermana Gaby por siempre querer saber de lo que hago y aprender de ello.

A mi compañera Sharon por aventurarse conmigo en este trabajo, por su paciencia y dedicación sobre todo en los momentos de dificultad y por su apoyo incondicional, este triunfo es de las dos.

Daniela Isabel Nieto Peralta

Agradecimientos

A nuestras familias por la comprensión y apoyo en todo el proceso de nuestra formación y alcance de las metas propuestas.

A nuestro director Jorge calderón por su incondicionalidad, por guiarnos, instruirnos y apoyarnos en todo momento, y sobre todo por creer en nosotras para la realización de este trabajo.

A la Universidad de la Costa por brindarnos las herramientas necesarias para la ejecución de este proyecto.

A las laboratoristas Ana Belén Villalobos y Erika Arbaláez por el tiempo y colaboración prestada en el proceso de elaboración de este estudio.

A nuestras amigas Karen y Natalia, que nos brindaron su apoyo y compañía incondicional.

Resumen

La presente investigación realizó un análisis de prefactibilidad de las alternativas de abastecimiento hídrico con las que cuenta la Universidad de la Costa, estas son el agua de pozo y agua potable suministrada por la empresa prestadora del servicio de acueducto (EPSA), con el objetivo de identificar un medio de abastecimiento potable viable para la institución. Para esto, se caracterizó los dos tipos de agua y se identificó cual requería de tratamiento, en este caso fue el agua subterránea ya que sus parámetros de alcalinidad y dureza no cumplían con los límites establecidos por la resolución 2115:2007, por lo cual se evaluó como alternativas de ablandamiento las técnicas filtración con carbón activado a base de endocarpo de coco donde se obtuvo una remoción de 8% de dureza total y un 25% de dureza cálcica y por otro lado, coagulación/ floculación con Cal-Soda la cual arrojó un resultado de 85% de efectividad para la remoción de dureza total y un 82% en la dureza cálcica, siendo este último el más eficiente en la remoción, sin embargo alteró algunos parámetros por lo cual se escogió como tratamiento la combinación de las dos técnicas utilizando el filtro de 20g con 80.48% de remoción de dureza total y 73.33% de dureza cálcica. En cuanto al análisis de prefactibilidad, se identificó que la alternativa más viable técnica y económicamente para que la universidad cuente totalmente con agua potable para su abastecimiento, es utilizar exclusivamente la prestación del servicio público de agua (EPSA).

Palabras clave: Carbón activado, coagulación, floculación, Cal, dureza, agua subterránea, análisis de prefactibilidad

Abstract

This research carried out a prefeasibility analysis of the water supply alternatives available to the University of the Coast, these are well water and drinking water supplied by the company providing the aqueduct service (EPSA), with the objective of identify a viable means of drinking supply for the institution. For this, the two types of water were characterized and which one required treatment was identified, in this case it was groundwater since its alkalinity and hardness parameters did not meet the limits established by resolution 2115: 2007, which is why evaluated as softening alternatives the filtration techniques with activated carbon based on coconut endocarp where a removal of 8% of total hardness and 25% of calcium hardness was obtained and on the other hand, coagulation / flocculation with Cal-Soda which threw a result of 85% effectiveness for the removal of total hardness and 82% in calcium hardness, the latter being the most efficient in the removal, however it altered some parameters for which the combination of the two techniques was chosen as treatment using the 20g filter with 80.48% total hardness removal and 73.33% calcium hardness. Regarding the prefeasibility analysis, it was identified that the most technically and economically viable alternative for the university to have totally potable water for its supply is to exclusively use the provision of the public water service (EPSA).

Keywords: Activated carbon, coagulation, flocculation, Lime, hardness, groundwater, prefeasibility analysis

Contenido

Lista de tablas y figuras.....	10
1. Introducción.....	13
2. Planteamiento y justificación del problema.....	15
3. Objetivos.....	17
3.1. Objetivo general	17
3.2. Objetivos específicos.....	17
4. Antecedentes.....	17
5. Marco teórico.....	26
5.1. Generalidades	26
6. Metodología.....	37
7. Análisis y discusión de resultados.....	44
8. Análisis de prefactibilidad.....	55
8.1. Situación actual.....	55
8.2. Alternativas de abastecimiento hídrico	57
9. Conclusiones.....	61
10. Recomendaciones y limitaciones.....	62
11. Referencias.....	64
12. Anexos.....	72

Lista de tablas y figuras

Tablas

Tabla 1. Tipo de agua según el grado de dureza.....	30
Tabla 2. Requerimientos para la toma y preservación de las muestras.....	40
Tabla 3. Dosificación de la cal y la soda según cada valor de dureza total obtenido.....	42
Tabla 4. Resultados de laboratorio del agua cruda.....	44
Tabla 5. Resultados de laboratorio del agua se servicio público de agua potable Triple A.....	47
Tabla 6. Resultados de laboratorio del agua tratada después de filtración con carbón activado.....	48
Tabla 7. Resultados de laboratorio del agua tratada después de prueba de jarras con cal y soda caustica.....	49
Tabla 8. Resultados de laboratorio del agua tratada después de prueba de jarras con cal y soda caustica y filtración con 14 gramos de carbón activado.....	50
Tabla 9. Resultados de laboratorio del agua tratada después de prueba de jarras con cal y soda caustica y filtración con 16 gramos de carbón activado.....	51
Tabla 10. Resultados de laboratorio del agua tratada después de prueba de jarras con cal y soda caustica y filtración con 20 gramos de carbón activado.....	52
Tabla 11. Porcentajes de remoción de dureza total y dureza cálcica.....	53
Tabla 12. Consumo promedio, máximo y mínimo del pozo y del servicio de triple A.....	55
Tabla 13. Consumo promedio, máximo y mínimo del pozo y del servicio de triple A.....	56
Tabla 14. Descripción gastos generados actualmente por el uso del pozo de la Universidad De La Costa.....	57
Tabla 15. Proyección de costos anual del pozo situación actual.....	57
Tabla 16. Proyección de costos anual con uso exclusivo del pozo.....	59
Tabla 17. Proyección de costos por insumos para el tratamiento del agua del pozo.....	59

Tabla 18. Ventajas y desventajas de alternativas para abastecer de agua potable la institución.....	59
---	----

Figuras

Figura 1. Incrustaciones y corrosión de tuberías Universidad de la Costa.	16
Figura 2. Procedimiento de osmosis inversa para el tratamiento de agua subterránea.....	19
Figura 3. El Spiractor para el ablandamiento del agua.....	20
Figura 4. Reactor de pastillas.....	21
Figura 5. Reactor.....	22
Figura 6. Reactor de pastillas.....	22
Figura 7. Sistema en flujo de agua continuo para remoción de arsénico.	23
Figura 8. Sistema en flujo de agua recircular para remoción de arsénico.....	23
Figura 9. Filtro de carbón activado a base de coco.	24
Figura 10. Filtro de arcilla para remoción de flúor.....	25
Figura 11. Localización de Universidad de la Costa.	38
Figura 12. Lugar de toma de muestra de agua subterránea de la Universidad de la Costa.....	38
Figura 13. Lugar de toma de muestra de agua potable laboratorio química ambiental Universidad de la Costa.....	39
Figura 14. Procedimiento carbonización y activación del carbón activado granular a base del endocarpo de coco.....	41
Figura 15. Procedimiento de prueba de jarras coagulación- floculación CAL-SODA.....	43
Figura 16. Filtración de las muestras de agua con carbón activado granular.....	44
Figura 17. Etapas del tratamiento propuesto.....	54
Figura 18. Histórico de consumo de agua de la Universidad de la costa 2015-2018.....	55
Figura 19. Costos mensuales por el servicio de acuerdo con Triple A 2015-2018.	56
Figura 20. Histórico de consumo agua de pozo 2015-2018.....	58

Glosario

Adsorción: Proceso en el que un material adhiere o retiene a otro en su superficie.

Agua potable: Se denomina al agua que cuenta con parámetros de calidad óptimos para el consumo humano y no afectara la salud.

Agua subterránea: Agua situada por debajo de la corteza terrestre.

Área superficial: Se denomina al espacio total que ocupa la superficie de un objeto.

Calidad del agua: Hace referencia a las condiciones en las que se encuentran las características físico- química y microbiológicas del agua.

Carbón activado: Material poroso, con capacidad adsorbente a base de componentes principalmente orgánicos.

Coagulación: Se refiere a la desestabilización de fracciones coloidales sujetas al agua a tratar a través de la neutralización de sus cargas.

Endocarpio: Se le llama a la capa más profunda del fruto, que rodea la semilla.

Filtración: Es denominado una técnica para la separación de sólidos, siendo esta por medio de un material poroso o de forma mecánica.

Floculación: Aglomeración de flóculos a partir del movimiento de masa hasta adquirir el tamaño necesario que le permita la precipitación.

1. Introducción

Como menciona Cobos, García, & Londoño (2009) el agua es uno de los recursos naturales esenciales para la vida, que día a día está siendo afectado por el rápido crecimiento de la población, la urbanización y la industrialización, por tal motivo, su conservación es vital para el ser humano y para su desarrollo social y económico. Sin embargo, a pesar de su importancia evidente para la vida del hombre, en las últimas décadas se ha tomado conciencia pública de su escasez y el riesgo de una disminución global de las fuentes de agua dulce (Palacio, L, 2012).

Como lo menciona Auge, M. (2007) la disponibilidad del agua dulce de todo el volumen de agua que se encuentra en el planeta es menor que el agua dulce, la distribución indica un predominio de las aguas marinas en más del 97% que evidentemente constituyen la reserva más importante para los usos corrientes del futuro. Solo el 3% corresponde al agua dulce, de la cual la gran mayoría se encuentra en los glaciares y casquetes polares por lo que es difícilmente accesible y sólo el 0,68% del total del agua se encuentra en forma de agua subterránea, mientras que el agua superficial (ríos y lagos de agua dulce) reúne menos del 0,01% del total (FCIHS, 2009).

Debido a que el agua superficial está más expuesta a la contaminación y generalmente es más cara, por el tratamiento que necesita para su potabilización, que la subterránea, se pone de manifiesto la importancia eventual del recurso hídrico subterráneo como fuente de abastecimiento de agua para todo uso.

Ahora bien, el agua subterránea se constituye en un recurso del subsuelo que brinda oportunidades de desarrollo a la sociedad, además de ser una alternativa para consumo humano en las zonas con demanda de agua potable y útil para llevar a cabo proyectos agroindustriales,

mineros y de hidrocarburos.

La calidad del agua se determina por su composición, viéndose afectada por factores naturales o antropogénicos; como es mencionado por López et al (2013), los factores naturales son el clima, su interacción con el medio geológico por el cual circula y el tiempo de residencia. Y los antropogénicos están directamente relacionados con fuentes potenciales de contaminación a actividades humanas. En ese sentido se hace necesario evaluar la composición física, química y microbiológica del agua mediante diferentes parámetros que garanticen que, efectivamente el agua está cumpliendo con los estándares vigentes para las actividades que se requieren. Por otro lado, uno de los parámetros fundamentales a monitorear de las aguas subterráneas es la Dureza Total, por lo que es una característica inherente a este tipo de agua, debido a la presencia de los iones de calcio y magnesio, que constituyen el mayor porcentaje de lo que se conoce como Dureza del agua (Neira, 2006) y su concentración depende en gran medida del tipo de depósito geológico que el agua ha atravesado en su camino al acuífero, en especial si ha tenido contacto con piedra caliza en presencia de CO_2 (Rodriguez et al, 2010)

La Organización Mundial de la Salud, propone evaluar este parámetro de forma fundamental, puesto que, aunque no hay evidencia que la dureza pueda causar problemas en la salud humana, lo cual aún es tema de estudio (WHO, 2006), provoca incrustaciones o daños en maquinarias industriales (Rodriguez et al (2019).

En la actualidad se recurre a la adsorción, la cual se califica como uno de los principales métodos de tratamiento para la remoción de contaminantes y/o algunos parámetros como la dureza; siendo el carbón activado uno de los absorbentes más utilizados por su gran superficie interna. (García & López, 2017); así otros métodos como el ablandamiento a partir de Cal.

La investigación tiene como propósito analizar la prefactibilidad de las alternativas de fuente hídrica de la Universidad de la Costa para identificar un medio de abastecimiento potable que sea viable para abastecer la institución permitiendo el consumo humano y sanitario; y una oportunidad de reducción de gastos financieros en el funcionamiento de la universidad, luego de establecer los costos asociados a dichas alternativas teniendo en cuenta su implementación en la universidad.

2. Planteamiento y justificación del problema

La gestión del agua se ha convertido en una de las preocupaciones más significativas dentro de la industria, que va de la mano con el control de la calidad y buen aprovechamiento del recurso, en procura del desarrollo sostenible; pues su manejo puede brindar ventajas como oportunidades de uso (Pedraza, 2011).

En este sentido, la Universidad de la Costa (CUC), goza del aprovechamiento de agua subterránea de un pozo para su abastecimiento sanitario y riego, por otro lado con el servicio público de agua potable con la empresa triple A en las aéreas de cocina, cafetería y laboratorios, por lo tanto adquiere una responsabilidad ambiental al momento de la toma de decisiones sobre este bien jurídico protegido (pozo); se encuentra obligada a cumplir con el pago de concesión de aguas subterráneas y además de ello, el respectivo valor por utilizar el servicio prestado por la empresa Triple A e incluso vincularse a programas de uso adecuado de este recurso natural (se vincula a un programa de uso eficiente del agua y debe reportar esta información a la autoridad ambiental correspondiente).

Abastecer toda la organización con agua subterránea, indica que el recurso debe contar con parámetros óptimos para suplir las necesidades de la comunidad universitaria, como menciona el (IDEAM, 2002), las principales razones para el establecimiento de programas de monitoreo de la calidad del agua se crean con la necesidad de verificar si cumple con las condiciones para los usos requeridos. Por ello la calidad del agua es una de las variables ambientales más importantes a ser monitoreada como lo menciona (Arango et al, 2008) y se determina comparando las características físicas, químicas y microbiológicas de una muestra de agua con los estándares normativos establecidos.

De acuerdo a Fernández et al. (2018), el calcio es el principal catión en la mayoría de las aguas subterráneas, ya que es proporcionado en forma de carbonato, silicatos o sulfatos por la difusión de rocas sedimentarias, metamórficas e ígneas; por otro lado, también se encuentra presente iones de magnesio debido a las rocas carbonatadas y evaporitas, aunque en menor proporción que el calcio; la alta concentración de estos iones proporciona a los altos valores de dureza en este tipo de agua. Una de las principales afectaciones de la dureza del agua es lo que ocurre en las industrias en sus procesos, como generación de vapor, enfriamiento, etc, ya que suele provocar corrosión e incrustaciones en tuberías (Rodríguez et al, 2019). En la actualidad, este problema se puede evidenciar en las redes de tuberías sanitarias de la universidad, lo que puede provocar futuros problemas para la institución. (Ver imagen 2-1)



Figura 1: Incrustaciones y corrosión de tuberías Universidad de la Costa. Fuente. Autores

Por lo anterior, se ha decidido buscar un medio de abastecimiento potable que sea viable para abastecer la institución, permitiendo el consumo humano y sanitario. Es por ello que se plantea ¿Cuál de las alternativas de fuente hídrica que cuenta la Universidad de la Costa es la más viable para su implementación como agua potable?

3. Objetivos

3.1.Objetivo general

Analizar la prefactibilidad de las alternativas de las fuentes hídricas con las que cuenta la universidad para abastecimiento de agua potable en la institución.

3.2.Objetivos específicos

- Determinar las características de las fuentes hídricas usadas por la universidad de la Costa.
- Identificar las necesidades de tratamiento de las fuentes hídricas usadas por la universidad de la Costa
- Comparar los costos asociados al uso de cada fuente hídrica de la institución.

4. Antecedentes

Desde tiempos atrás es necesaria para el hombre la disponibilidad de agua de consumo humano, ya que es uno de los elementos vitales para su calidad de vida. En la antigüedad el agua provenía de cuerpos de agua abiertos sin ninguna técnica de tratamiento; sin embargo con el pasar del tiempo y el crecimiento de la población se vio necesario idear un lugar de almacenamiento y mecanismo de distribución, no obstante, el hombre se dio cuenta que los afluentes utilizados eran finitos y que necesitaban una técnica de tratamiento para utilizar el agua

residual generada, siendo los primeros en emplear un sistema de tratamiento los griegos a partir de la aireación para realizar cambios a las propiedades contaminantes (Rosell, 2009).

Seguidamente los Romanos, quienes se denominaron los mayores constructores, por sus grandes presas para el almacenamiento y sistemas de distribución a base de cemento, bronce, plata, madera, plomo; siendo este último material quien les permitió notar algunos hallazgos que se podrían provocar, dentro de estos estaban enfermedades, por lo tanto, se tuvo que variar las condiciones iniciales y así brindar un buen sistema.

El primer sistema de suministro fue realizado por John Gibb en 1804, construyendo en Escocia una planta completa de tratamiento, incluyendo la filtración, en 1806 en París inicia la función de la mayor planta de tratamiento conocida, donde los parámetros eran más rigurosos, el tiempo de sedimentación que esta poseía era igual a doce -12- horas antes, de pasar al proceso de filtración, la filtración, de la misma forma, era más compleja y eficaz, por lo que en su filtro se usaba carbón, y la capacidad de este era de seis (6) horas, pasando hasta 1827 el inglés James Simplón diseñó y llevó a la implementación un filtro de arena, este lograba remover más los agentes contaminantes que se podían encontrar, convirtiéndolos menos perjudicial para la salud, se le denominara el primer sistema efectivo en plantas de tratamiento utilizado con el fin de mantener la salud pública (Rosell, 2009).

En la actualidad existe una gran variedad de tratamientos de todo tipo de agua; Fiotto et al. 2008, diseño una alternativa de tratamiento del agua subterránea utilizada en una planta industrial dedicada al transporte de Gas y sus derivados; considerando inicialmente un proceso de osmosis inversa por el alto contenido de sólidos totales disueltos; este proceso se basa en enviar el agua a tratar por medio de una bomba a una presión superior a la osmótica directo a la

membrana semipermeable, no obstante uno de los lados de la membrana consta de una presión alta que hace que el solvente la atraviese, como se muestra a continuación:

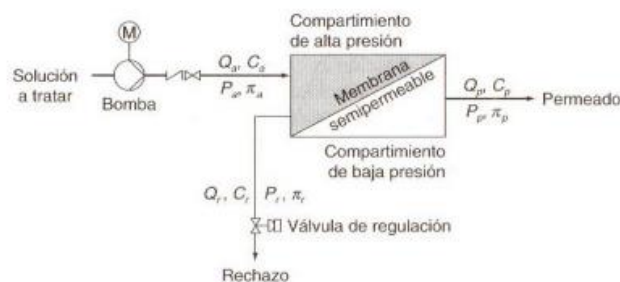


Figura 2: Procedimiento de ósmosis inversa para el tratamiento de agua subterránea.
Fuente: Rosell, 2009

Seguidamente, el proceso cuenta con una fase de tratamiento de efluentes, compuesta por un sistema de lodos activados, acompañado de una cámara de aireación y sedimentador secundario.

Diversos autores han realizado estudios con materiales reactivos, tal como Navarro (2010), que empleó una columna conformado por un cilindro de metacrilato con longitud de 750 mm y grosor de 5mm, como técnica de tratamiento para el agua de un pozo del acuífero de la Cubeta de la Llagosta, que en su parte superior poseía un embudo con una plancha de vidrio agujerada, siendo el soporte de la columna que actuara como filtro, ya que esta se encuentra formada por una capa de poliestireno, óxido de magnesio, carbón activo de origen vegetal y una segunda capa de poliestireno; la caracterización tubo un tiempo de 260 minutos con un caudal de 3.3 L/h, obteniendo como resultado buena remoción de algunos metales pesados y metaloides, mientras que Chavarro, (s.f), propuso como sistema de tratamiento para agua subterránea y superficial una planta con un sistema de aireación, seguida de las etapas coagulación, floculación, sedimentación, filtrado y almacenamiento; y un caudal de 2.0 L/s.

Ahora bien, según lo mencionado por Fernandez (2016), a lo largo de la historia se han empleado numerosos métodos para eliminar la dureza del agua subterránea, entre esos métodos de ablandamiento se encuentran proceso cal- carbonato, procesos de membranas, efecto campo magnético y el intercambio iónico. Basados en estos métodos existen equipos ablandadores desde finales de los años 30, según lo citado por Gutiérrez, (2000), en 1938 fue desarrollado por Zentnerun reactor de flujo ascendente de forma cónica. Este sistema fue patentado y fabricado por la compañía Permutit, y se le conoce como “Spiractor”, estos son tanques cónicos llenos de arena y son utilizados para ablandar el agua mediante un proceso conocido técnicamente como cristalización en lecho fluidizado, este proceso elimina los minerales que hacen que el agua sea dura por precipitación en partículas de arena que se suspenden en el agua, el diseño Permutit es básicamente una modificación del diseño original de Zentner.

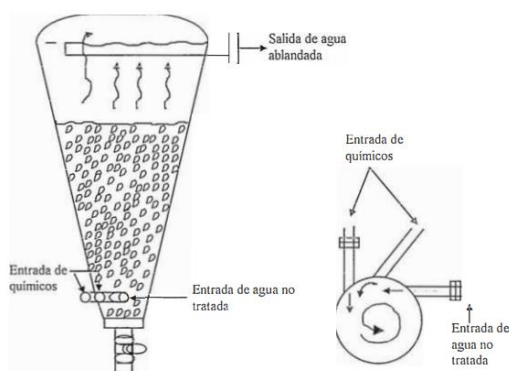


Figura 3: El Spiractor para el ablandamiento del agua.
Fuente. Gutiérrez, 2000.

Como se muestra en la figura 3, el agua cruda entra en la parte inferior del Spiractor tangencialmente, lo que provoca un flujo de remolino helicoidal que produce el lecho fluidizado. Al mismo tiempo, se agrega una lechada de cal también, que actúa como catalizador, ayudando a la precipitación. La lechada de cal convierte el bicarbonato de calcio disuelto en carbonato de calcio sólido que precipita sobre las partículas de arena. Se forman esferas de

calcita (CaCO_3), que más tarde se pueden descargar del equipo. El agua ablandada sale de la parte superior.

Por otro lado, existe el reactor Pellet o reactor de pastillas, donde el agua dura se inyecta con la cal o el carbonato sódico y se posa en la parte inferior del lecho, luego el agua se hace pasar hacia una cámara de fluidización con un flujo ascendente, como se muestra en la figura 4-3.

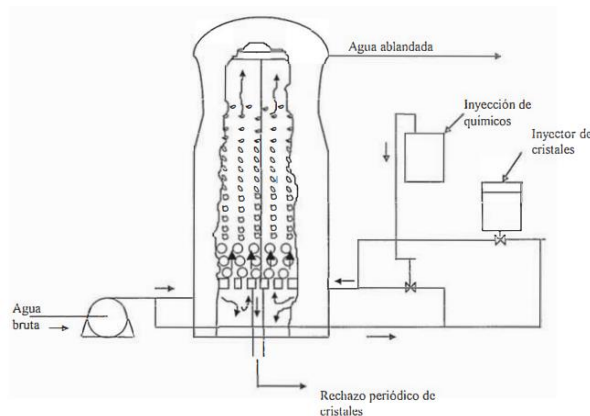


Figura 4: Reactor de pastillas.
Fuente. Gutiérrez, 2000.

Según (Aldaco, 2005), otras alternativas surgieron posteriormente a partir del reactor Pellet y del Spiractor, como la del “Blackpool reactor” y el reactor “Amsterdam”, el primero se diferencia porque la entrada del reactor es de forma vertical en la parte superior (ver figura 4-4), y el segundo es totalmente cilíndrico con un fondo que permite la inyección separa del agua y del reactivo (ver figura 4-5), pero su principio de eliminar la dureza es el mismo.

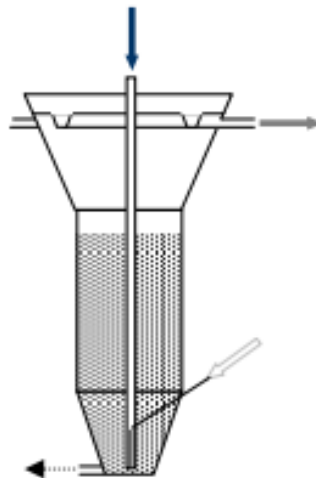


Figura 5: Reactor Blackpool.
Fuente. Aldaco, 2005.

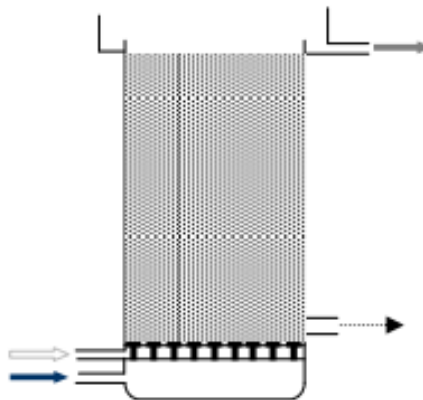


Figura 6: Reactor de pastillas.
Fuente. Aldaco, 2005

La adsorción como tratamiento no solo se utiliza en la remoción de dureza, sino también para otros contaminantes, por ejemplo, Flores et al (2009), realizó un estudio en Hidalgo México, que consistió en la remoción de arsénico en un cuerpo de agua subterránea por medio de roca Caliza; las pruebas se realizaron mediante torres empacadas con la roca, teniendo un flujo de agua continuo y una segunda prueba con un flujo de agua en recirculación, como se observa a continuación:

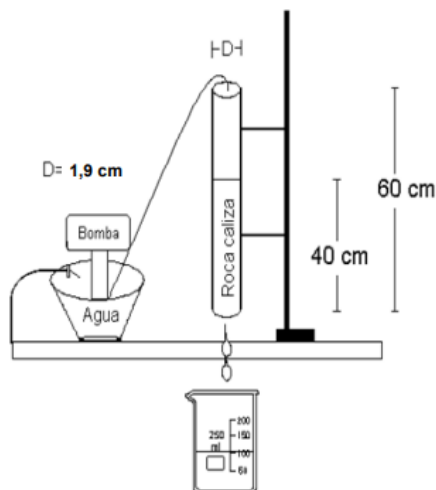


Figura 7: Sistema en flujo de agua continuo para remoción de arsénico.
Fuente. Flores et al, 2009.

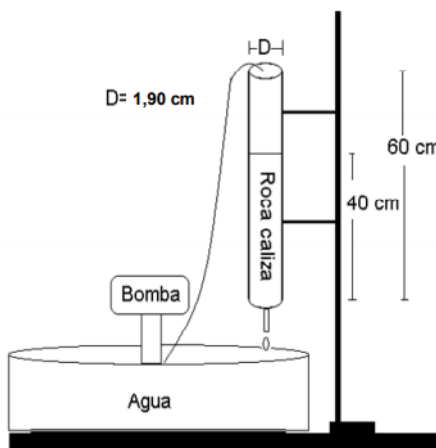


Figura 8: Sistema en flujo de agua recircular para remoción de arsénico.
Fuente. Flores et al, 2009.

El precipitado se colocó en agitación con roca caliza y se filtraron, finalmente se analizó por espectrometría de absorción atómica; los resultados obtenidos de la concentración del contaminante (arsénico) en la roca fueron significativos.

Por otro lado, uno de los mecanismos adsorbentes más utilizados en el tratamiento de agua son los filtros de carbón activado; Bravo et al, (2017) realizó una investigación que tenía como finalidad valorar la eficiencia del carbón activado procedente de residuo agroindustrial de coco

para remover contaminantes de agua sintética, la cual estaba conformada por suelo limoso y cloro. Se elaboraron filtros de 25, 50 y 100g de carbón activado:

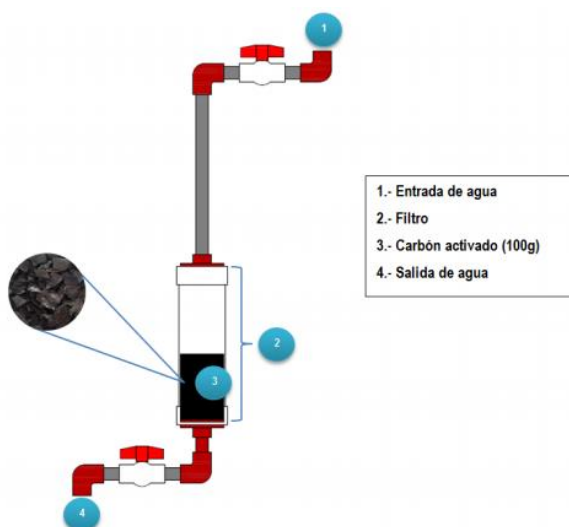


Figura 9: Filtro de carbón activado a base de coco.
Fuente. Bravo et al, 2017.

Los resultados obtenidos arrojaron valores significativos para el filtro de 100g con una eficiencia del 75.68%, además de eso el cloro libre residual y los sólidos suspendidos presentaron diferencias significativas.

En el distrito de San Juan de Lurigancho/ Lima, Espinal, 2017 también evaluó el rendimiento de remoción del carbón activado a base de coco, con una muestra de agua residual doméstica. Cabe destacar que el autor diseño dos filtros, uno de carbón activado con tamaño de partícula polvo y otro granular; Se evidenció remoción del 99.96% de aceites y grasas; 98,48% de coliformes y 56,20% de DBO_5 con el filtro de tamaño de partícula polvo, siendo este el más eficiente con 85% de eficiencia en comparación al granular con un 70%.

Parrera, (2017) elaboro filtros de carbón activado de 20, 50, 70 y 100 gramos, con tiempos de residencia de 30, 60, 90 y 120 minutos, para remover hierro de una muestra de agua del río Moche, el cual contenía 2.66 ppm de concentración de hierro; los resultaron arrojaron que el

mejor filtro fue es de 120 g de carbón, con un tiempo de incidencia de 120 minutos ya que alcanzó a disminuir la concentración del contaminante a 0.11 ppm.

No obstante, la adsorción también se puede emplear como tratamiento mediante sistemas diferentes a carbón activado, como por ejemplo: en el distrito de Anuradhapura, Padmasiri et al, (1995) desarrollo un estudio, donde la remoción de flúor era su principal objetivo por medio de filtros de intercambio iónico- adsorción de bajo costo; el medio estaba conformado por arcilla enriquecida con hierro a baja temperatura, además de silicatos, aluminatos y hematita, sobre la arcilla una capa carbón a base de coco y luego una de gravilla.

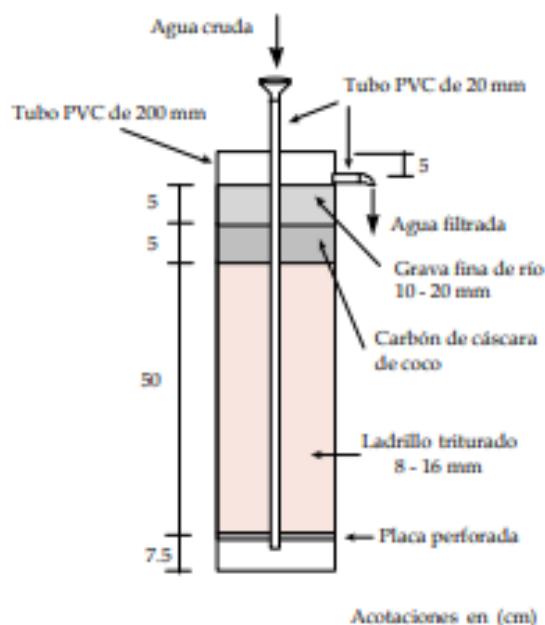


Figura 10: Filtro de arcilla para remoción de flúor.
Fuente. Padmasiri et al, 1995.

El proceso de manejo con un tiempo de retención de 16 horas generando 10 litros de agua filtrada por la mañana y en las horas de la tarde 5 litros con un tiempo de retención de 8 horas; su eficiencia fue significativa, sin embargo, la vida útil del filtro es de aproximadamente dos a tres meses.

La zeolita y vermiculita (arcilla), hacen parte del conjunto de materiales utilizados en el tratamiento del agua. Inglezakis et al, (2010) demostró que estos materiales remueven hierro y manganeso; la muestra a tratar provenía de agua subterránea de la región de Attica,, contenía concentraciones de 1.5 ppm de Fe y 0.5 ppm de Mn, al realizar la filtración con cada uno de los materiales, se registró remoción de 88-94% de Fe y 65-100% de Mn con vermiculita y valores de 22-90% en Fe y 61-100% en Mn para la zeolita, siendo la arcilla la más eficiente.

Finalmente, existen cerámicas microporosas de alúmina-silicato de litio que son buenos adsorbentes, Simoni et al, (2012) realizaron un filtro con este material en África, con una muestra de agua de altas concentraciones de bacterias y sólidos suspendidos; este estudio demostró que el filtro tiene eficiencia del 99.99% en la remoción de bacterias y sólidos suspendidos en al agua.

5. Marco teórico

5.1.Generalidades

5.1.1. *Agua subterránea*

El agua subterránea es conocida como aquella situada en el subsuelo, precisamente por debajo del nivel freático, siendo su fuente principal el agua lluvia a través del proceso de infiltración; sin embargo puede alimentarse de ríos, lagos, lagunas o arroyos, con largos tiempos de residencia, lo que genera que se almacene en grandes volúmenes (Caraballo& Xavier. 2012). Este tipo de agua es captada mediante pozos de agua subterránea y sondeo; siendo el primero un agujero que perfora a la tierra hasta la reserva hídrica, revestido de cemento, ladrillo o anillos prefabricados para evitar su deterioro; cabe destacar que este tipo de captación es utilizada cuando el acuífero no es tan profundo como indica Fuentes (1993) la profundidad no suele sobrepasar los 15 a 20

metros, mientras en el segundo mecanismo se realiza una entubación metálica con una cobertura de diámetro a 60 centímetros y profundidad que excede los 20 metros.

5.1.2. Composición química del agua subterránea

Como establece Vélez et al. 2011 en la guía “Las aguas subterráneas- un enfoque práctico”, una vez el agua se infiltre entre el suelo y la roca, se diluyen materiales que cambian su composición inicial; partiendo de que el agua lluvia es una de las principales fuentes de agua subterránea, las características que esta tenga dependerá de su localización geográfica y de factores climáticos, es por ello que el estado de los parámetros químicos del agua subterránea va de acuerdo a la composición del agua infiltrada, pero además del tipo de roca por donde haya circulado y los procesos microbiológicos del suelo que haya sufrido.

Foster et al. (2005), el agua subterránea, se encuentra formada por nueve iones, los cuales forman el 99% de su contenido soluto, dentro de ellos se encuentran: Na, Ca, Mg, K, HCO₃, Cl, SO₄, NO₃, y Si, cuya proporción dependerá del flujo del agua en la roca. “Los iones de calcio y magnesio, son dos de los componentes químicos más importantes... constituyendo el mayor porcentaje de lo que se conoce como Dureza del agua” (Neira, 2006). Como se mencionó anteriormente, la fuente de estos minerales va de acuerdo a factores geológicos; aquellas aguas con gran contenido de calcio y magnesio, por lo general hacen parte de cuencas de roca sedimentaria, como roca caliza y creta, mientras las aguas blandas han tenido un recorrido con rocas impermeables como granito (Neira, 2006). La importancia del contenido de Ca y Mg, radica en los impactos generados a nivel industrial y en la salud de las personas.

5.1.3. El Agua potable y su composición química

Se le llamada agua potable a aquel recurso hídrico que cuenta con los parámetros de calidad óptimos para ser consumida por los seres humanos(Casero, 2008); Existen diversos tipos de fuentes hídricas: como agua meteórica, superficial, subterránea, de mar, manantial, entre otras (INN, 2007); sin embargo no todas son aptas sin tratamiento para ser consumidas por el hombre por tal motivo nace la necesidad de generar normas de calidad (Orellana, 2005); en este caso, Colombia en la resolución 2115:2007 indica los valores máximos aceptables de las características físico- químicas, evaluando parámetros como: Color aparente, color, sabor ,turbiedad, conductividad, COT, NO₂, NO₃, F, Ca, CaCO₃, Fe, Mg, Cl,Mn,So₄,PO₄, entre otros.

Es importante resaltar que este tipo de agua a través de los años se ha convertido en un producto industrial y en algunos casos con alarmantes signos de escasez, ya que si bien hay disponibilidad de agua, pero no apta para ser consumida (Orellana, 2005); El carácter industrial del suministro de agua, es principalmente un sistema de tratamiento de agua potable que inicia con la captación de agua cruda, y procede a procesos de tratamiento que van de acuerdo a la fuente hídrica, para finalmente ser distribuida a los usuarios y cobrar las cantidades consumidas, siendo esta parte de una actividad económica industria (Cra, 1996)

5.2.Impactos del agua dura en la salud y en la industria

WHO, (2006) indica que no existe un nivel permisible para la dureza del agua basado en los efectos que puede causar en la salud de los seres humanos, sino en las desventajas de utilizar un agua muy dura a nivel industrial, doméstico y el sabor que esta puede tener. En las Guías para la Calidad del Agua Potable, se menciona que los niveles de dureza en el agua de consumo no son peligrosos para la salud. El calcio y el magnesio hacen parte del organismo humano, dentro de

las funciones del calcio se encuentra la transmisión neuromuscular de estímulos químicos y eléctricos, hace parte de la contracción muscular y cardíaca; de igual forma ayuda a la prevención de osteoporosis, osteomalacia e hipertensión; y el magnesio actúa como catalizador de reacciones enzimáticas, como la glicolisis, metabolismo del ATP, transporte de sodio, potasio y calcio en las membranas celulares, ácidos nucleicos y síntesis de proteína, previene la hipertensión, aterosclerosis vascular, eclampsia, infarto al miocardio y vasoconstricción (Neira, 2006).

Por el contrario a lo que ocurre en las industrias al trabajar con aguas duras en sus procesos, como generación de vapor, enfriamiento, etc, ya que suele provocar incrustaciones, que interfieren con la transferencia de calor reduciendo la eficiencia y presentando fallas en tuberías que pueden generar explosiones; no obstante, Rodríguez et al (2019), también indica que “el agua dura empleada como vehículo en la aplicación de herbicidas puede afectar adversamente la emulsibilidad y dispersión del herbicida en el vehículo y en consecuencia en su fitotoxicidad”; es por ello que a nivel industrial sin importar el proceso a desempeñar se debe contar con la calidad de agua adecuada.

5.3.La dureza

El concepto de dureza ha sufrido cambios con el pasar del tiempo; se conocía como la capacidad que tiene el agua para formar soluciones de jabón, y actualmente se encuentra contextualizada según Millán, Mathison, Alvares & Jarbough (2003), como el conjunto de minerales disueltos en ella; dentro de ellos: Iones de magnesio, calcio, bario, hierro, entre otros que afectan la formación de espuma al estar en contacto con este tipo de agua, presentando otros problemas como incrustaciones (Martínez, 2012).

Rodríguez& Rodríguez (2010), indican que la dureza se clasifica como, temporal o permanente, de acuerdo a su composición; la primera corresponde a los bicarbonatos, carbonatos de calcio y magnesio o hierro; su ablandamiento se da principalmente por la precipitación del bicarbonato, generando a su vez Dióxido de carbono y descendiendo el pH, por la producción de ácido carbónico. En cuanto a la dureza permanente, también conocida como dureza no carbónica, se define, como la diferencia entre la dureza total y la alcalinidad, se caracteriza por estar formada de sulfatos de calcio, magnesio y cloruros; esta no puede someterse a calor, ya que la solubilidad de los anteriores compuestos aumenta directamente con la temperatura hasta cierto valor.

La Organización Mundial de la Salud (WHO, 2004) clasifica el agua según su grado de dureza, como se muestra en la tabla 5.3-1.

Tabla 1

Tipo de agua según el grado de dureza.

CaCO ₃ (mg/L)	Tipo de agua
0-60	Blanda
61-120	Moderadamente dura
121-180	Dura
>180	Muy dura

Fuente. (WHO, 2004).

En cuanto a la normativa colombiana los valores máximos permisibles para agua de consumo humano es 300 mg/L CaCO₃ (Resolución 2115, 2007).

Métodos de ablandamiento

Filtración con carbón activado

Dentro de los métodos de ablandamiento del agua se destaca la filtración de carbón activado, el cual hace referencia a un material poroso, generado a partir de carbonización de un precursor rico en carbonos, principalmente orgánico, como: madera, carbón mineral, huesos, breas, coque y cascaras de frutos, (Luna, González, Gordo & Martín, 2007). Los materiales a base de carbón, fueron aplicados inicialmente por los egipcios, para la filtración del agua, con el fin que reducir los malos olores y sabores. En 1854 se realizó su implementación en instalaciones de filtros en los sistemas de ventilación; al pasar 18 años se aplicó para la fabricación de máscaras, evitando la inhalación de vapores químicos y se apreció más a nivel industrial, con la llegada de la primera guerra mundial; finalmente el carbón activado aumentó su demanda con la aplicación para las plantas de tratamiento de agua en los años 60 (Luna, González, Gordo & Martín, 2007).

De acuerdo con Carrillo & Sánchez (2013), se caracteriza por tener un gran poder de retención, ya sea de moléculas, átomos o iones; consta de buena estabilidad térmica y es de carácter hidrófobo, es decir que repele al agua (Luna et al, 2007); esto se debe al tamaño y distribución que tienen sus poros, ya que puede ser de tres maneras: microporos, cuando cuentan con un diámetro de 1 nm; mesoporos, con un diámetro de 25 nm y macroporos con un diámetro de 500 nm; la variabilidad de los tamaños depende, ya sea del material precursor; del tipo y/o el tiempo de activación. Un carbón activado que conste de microporos, tendrá mayor capacidad de retención de contaminantes y los mesoporos y macroporos, le aportan el medio para adsorber partículas de tamaños más grandes, por ejemplo, los colorantes. Otra de las características de este material es su superficie específica siendo esta aproximadamente de 500 a 1500 m² por gramo; un

área superficial de 1.100.000m² por 1kg de carbón y según su composición química, está conformado en un 75-80% de carbono y el otro 5-10% de cenizas (Carrillo & Sánchez, 2013).

Ciertos mecanismos influyen en la adsorción de este material; por ejemplo: el área superficial es proporcional a su adsorción; en cuanto a la temperatura, si se encuentra a temperaturas bajas, aumentará su capacidad de adsorción; entre otros, pero uno de los más importantes es su carácter apolar y las fuerzas de Van Der Waals, que le permiten retener hidrocarburos, fenoles, colorantes, por su naturaleza apolar (Fernández. et al. 2005).

El área superficial del carbón activado se debe a que, es un material de estructura carbonatada, que se encuentran combinados formando una especie de placas, separadas y con diferentes orientaciones; entre esas placas hay espacios llamados poros; según, Fernández, castillo, Rey, García & Huertemendia (2005), “El área de superficie del carbón activado varía dependiendo de la materia prima y del proceso de activación; ya que son las altas temperaturas, la atmósfera especial y la inyección de vapor del proceso de fabricación del carbono activado lo que activa y crea la porosidad, dejando mayormente una esponja de esqueleto de carbón”; es por ello que el carbón se divide en dos grupos: carbón granular, con un tamaño de partícula de 1-5 mm y el carbón pulverizado, que presenta un tamaño de partícula de 15-25 μ m (Manual, Sf).

Existen dos mecanismo de adsorción según Grosó Cruzado, (1997) en primer lugar la Fisisorción, es un proceso donde no existe intercambio entre los electrones del soluto y el absorbente, actuando las fuerzas de Van Der Waals; y el segundo mecanismo es la Quimisorción, suele ser irreversible, porque ocurren modificaciones de las estructuras químicas del soluto y el carbón, ya que hay interacción de electrones entre ellos; De acuerdo a Clarimex, (1999) , dentro de los factores que aumentan o disminuyen el rendimiento del carbón activado se destaca el

tamaño de los poros y la temperatura; cuando el diámetro de los poros del absorbente es uno o cinco veces el diámetro del adsorbato, el proceso de adsorción será más eficiente; en cuanto a la temperatura juega un papel fundamental para alcanzar el objetivo que se quiere; en el caso de carbones activados, a temperaturas mayores de 600°C en ausencia de oxígeno y enfriándose en atmosfera inerte, son negativos, lo que quiere decir que es más eficaz en la adsorción de moléculas acidas y son llamados carbones H, mientras los carbones activados con una temperatura inferior a 500°C y con oxígeno, el carbón se activa positivamente, llamándose carbón L; estos tipos de carbones tienen la capacidad de adsorber mejor los adsorbatos con moléculas de pH básico; sin embargo, cuando se realiza la activación a una temperatura de 500 o 600°C, en presencia de oxígeno al momento que se enfría, da como resultado un carbón activado de tal manera que adsorbe por igual los adsorbatos con pH básico o ácido.

Coagulación con Cal

Otro de los métodos de ablandamiento del agua es por medio de la cal-soda (ash), siendo catalogado como uno de los métodos químicos más importantes de ablandamiento (Neira, 2006). Según Oliva, (2005) la remoción del Carbonato de Calcio presente en las aguas duras es el proceso mediante el cual se reducen o eliminan los iones de calcio y magnesio presentes en dicho tipo de aguas conformando lo que se conoce como dureza total. En la actualidad existen varios métodos utilizados para la remoción de los carbonatos de calcio entre los que menciona Jairo Romero en su libro “Calidad del agua” están, ablandamiento con Cal – Sosa (Soda Ash), ablandamiento con Resinas de Intercambio Catiónico y ablandamiento mediante cristalización con Soda Cáustica.

Lo que se logra con este método es precipitar el calcio como carbonato de calcio aumentando la concentración de carbonato en el agua; logrando también precipitar el magnesio cuando se aumenta la concentración de iones hidróxido. Todo esto es gracias a que el CaCO_3 y el $\text{Mg}(\text{OH})_2$ poseen baja solubilidad. Los compuestos insolubles del proceso forman flóculos sedimentables y son removidos como lodo en dispositivos de sedimentación. Efectuándose este método en dos etapas: en la primera haciendo el tratamiento con cal y en la segunda con soda ash; utilizando equipos para mezclar los productos químicos de ablandamiento con el agua, es decir tanques sedimentadores en los cuales se realizan las reacciones de ablandamiento y el asentamiento de los precipitados; filtros rápidos de arena para la clarificación final del agua; y en plantas más modernas, existen equipos generadores de dióxido de carbono gaseoso para la re-carbonatación del agua ablandada con el fin de evitar la incrustación excesiva (Nordel, 1976).

Uno de los factores importante en la eficiencia del método es la temperatura indica Neira, (2006), porque la solubilidad depende de este parámetro, ya que a mayor temperatura se obtiene un mejor resultado, acelerando la velocidad de reacción. Por otra parte, este tratamiento genera gran cantidad de lodos, considerando la combinación de la cal con el contenido soluble, sin embargo, el mecanismo de recarbonatación da la posibilidad de recuperar de 1.2 a 1.3 toneladas de cal por cada tonelada de cal usada, que puede ser comercializado.

Intercambio Iónico

Este método consiste en la remoción de iones al ser transferidos a un material intercambiador iónico, que consta de capacidad de intercambio, es decir, puede llegar a saturarse con iones indeseables y cuando esto ocurre se lava con una solución regeneradora que sustituye a lo removido devolviéndole su utilidad (Neira, 2006). El tratamiento se puede desarrollar de acuerdo

a tres procedimientos teniendo en cuenta el tipo de resina y compuestos regenerantes: Resina catiónica- Ciclo del sodio, la cual puede eliminar totalmente la dureza, consiste en colocar el agua en contacto con la resina, en este caso Zeolita (Silicato de aluminio y sodio), la cual consta de iones de sodio que remplazan los iones de calcio y magnesio; cabe resaltar que cuando esta se satura, puede regenerarse con la adición de cloruro de sodio (Sagan,2006).

Otro de los mecanismos es la Resina Catiónica- Ciclo del hidrogeno, es similar al anterior tipo de resina, con la diferencia que para la regeneración de esta se utiliza por lo general ácido sulfúrico; este proceso se caracteriza por remplazar los cationes de calcio y magnesio por iones de hidrogeno; además también se usa con resinas intercambiadoras catiónicas que sean débilmente acida, donde el hidrogeno remplaza solo cationes asociados a sales de ácidos débiles como indica Neira, (2006). El ultimo procedimientos es por desmineralización, por medio de resinas catiónicas y aniónicas; la remoción se da a través de un intercambiador del ciclo del sodio o del hidrogeno y finalmente los aniones a los que estén asociados se eliminan; Cabe resaltar que las resinas de intercambio anionico pueden ser base débil, que remueven aniones asociados a ácidos fuertes; por otro lado, las resinas de base fuerte; se utilizan de acuerdo al tratamiento (Sámano, 2005).

Condensación

Neira (2006) indica que es un proceso térmico, donde el recurso hídrico es sometido a calentamiento hasta ebullición, realizando la recolección del vapor por medio de un condensador; en el proceso, el agua se concentra, hasta rebosar la solubilidad de la sal, lo que provoca la precipitación en forma de incrustación donde el agua es evaporada, cuyas incrustaciones están compuestas de calcio, magnesio y silicio.

5.4.Aprovechamiento de agua subterránea

El uso intensivo de las aguas subterráneas inicio aproximadamente hace cuatro decenios; este recurso sigue siendo mal comprendido, su uso adecuado debe realizarse por medio de una buena gestión y educación (Madurga, 2001).

“La disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos para determinados tipos de uso depende fundamentalmente de la calidad físico química, biológica y radiológica” según Caraballo et al (2012). Las ventajas que brinda este tipo de agua son de tipo económico, social, ecológico e hidrológico y su calidad depende de la actividad destaca Madurga, (2001).

Inicialmente, el agua subterránea es una fuente de agua potable, lo que ha sido de vital importancia para países en vía de desarrollo; sin embargo su disponibilidad varia; por ejemplo es España el 22% de la población se abastecen de aguas subterráneas, en la India el 80% de los habitantes suplen sus necesidades con este tipo de agua y en Estados Unidos el 80% se abastece de pozos de acuerdo a Mimam, (2000); La calidad del recurso destinada para consumo depende de los estándares de cada país, en Colombia están en el Decreto 2115 del 2007, en el cual se describe los límites permisibles de sus parámetros físico- químicos y biológicos que no perjudican la salud de las personas; Las industrias también muestran un gran interés y fiabilidad por este medio hídrico, ya que les permite continuar con sus procesos en épocas de sequía (Madurga, 2001). El 70% de la población mundial destina el agua subterránea para actividades de riego, principalmente en países áridos y semiáridos ; brinda una mejor productividad en el suelo y a nivel económico, sin embargo se debe tener en cuenta a cantidad de solidos disueltos, conductividad, contenido de sodio y dureza, debe contener pocos cloruros, sulfatos y nitratos

(Vélez et al, 2011), finalmente genera casi el doble de empleo por unidad de superficie regada según un estudio en Andalucía /España (Madurga, 2001).

5.5. Estudio de prefactibilidad

De acuerdo con Pimentel, E. (2008) antes de iniciar con detalles el estudio y análisis comparativo de ventajas y desventajas que tendría determinado proyecto de inversión, es necesario realizar un estudio de prefactibilidad; el cual consiste en una breve investigación sobre el marco de factores que afectan al proyecto, así como de los aspectos legales que lo afectan. Así mismo, se deben investigar las diferentes técnicas (si existen) de producir el bien o servicio bajo estudio y las posibilidades de adaptarlas. Además, se debe analizar la disponibilidad de los principales insumos que requiere el proyecto. Otro aspecto importante que se debe abordar en este estudio preliminar, es el que concierne a la cuantificación de los requerimientos de inversión que plantea el proyecto y sus posibles fuentes de financiamiento. Finalmente, es necesario proyectar los resultados financieros del proyecto.

6. Metodología

6.1. Área de estudio

6.1.1. Localización

El presente estudio se realizó en la Universidad de la Costa, ubicada en la ciudad de Barranquilla, departamento del Atlántico, respectivamente en la calle 58 #55-66, como se observa a continuación:



Figura 11: Localización de Universidad de la Costa.
Fuente. Google Earth.

La toma de muestra del agua subterránea en la universidad se llevó acabo través de una llave ubicada en el patio del laboratorio de química ambiental con coordenadas ($10^{\circ} 59' 44.26''$ N, $74^{\circ} 47' 27.15''$ W). (Ver figura 11) y la toma de agua potable por medio de una de las llaves del mismo laboratorio (ver figura 12)



Figura 12: Lugar de toma de muestra de agua subterránea de la Universidad de la Costa.
Fuente. Autores.



Figura 13: Lugar de toma de muestra de agua potable laboratorio química ambiental Universidad de la Costa.
Fuente. Autores.

De acuerdo con el departamento de calidad de la Universidad de la Costa CUC, el pozo abastece todos los baños de la universidad, además se utiliza para riego, aseo de los baños y pisos. Su almacenamiento se da en cuatro tanques, dos de ellos de 10 m³ de volumen, uno de 20 m³ y otro de 105 m³. El caudal de captación es de 3L/s, con un porcentaje de pérdida del 5%, y el pozo tiene una profundidad de 65 metros. Este abastecimiento se da por bombeo con ayuda de una bomba sumergible de 1HP, 7 u 8 veces al día. De acuerdo a la información suministrada no hay registros ni evidencias de la procedencia del agua que abastece el pozo de la universidad. Mientras que el agua potable suministrada por Triple A abarca las áreas de laboratorios, cocinas y cafetería.

6.2. Metodología de muestreo

Previo a la actividad de toma de muestras, se organizó el material requerido para el desarrollo de la actividad, incluido los reactivos y lo equipos a utilizar. Una vez revisados, se procedió a realizar el trabajo de muestreo en los puntos establecidos; con las recomendaciones estipuladas por la Guía IDEAM, “Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y

subterráneas” proporcionada por el IDEAM (2004), utilizando el método por bombeo para la toma de muestra donde se requería muestras verticales simples y frasco de vidrio para su preservación.

Las muestras fueron preservadas de acuerdo a lo establecido por el Estándar Método en su edición 23 (E. W. Rice et. Al, 2012). El muestreo se realizó de manera que se garantizó la integridad física, química, microbiológica de las muestras durante el período transcurrido entre la toma y los análisis de las muestras; aplicando métodos de preservación internacionalmente aceptados.

La evaluación de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos en el presente trabajo se realizó con los recursos técnicos que posee el laboratorio Ambiental de la institución, y se tomó el procedimiento basado en el Standard Methods for the Examination of Water and Waste water (E. W. Rice et. Al, 2012), como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2
Requerimientos para la toma y preservación de las muestras.

Parámetro	Recipiente	Volumen (ml)	Tipo de muestra	Preservación	Metodología
					Standard
					Methods
					(Codigo)
Turbiedad	V	50	S	Análisis inmediato	2130 B
Color aparente	V	50	S	Análisis inmediato	2120 B
pH	V	50	S	Análisis inmediato	4500 H ⁺ B
Alcalinidad	V	25	S	Análisis inmediato	2320 B
Dureza total	V	25	S	Análisis inmediato	2340 C
Dureza cálcica	V	25	S	Análisis inmediato	2340 C
Sólidos totales	V	50	S	Análisis inmediato	2540 B

Sólidos disueltos	V	50	S	Análisis inmediato	2540 C
Conductividad	V	50	S	Análisis inmediato	2510 B
NO_3^- ((mg/l)	V	50	S	Análisis inmediato	4500 NO_3^- D
NO_2^- ((mg/l)	V	50	S	Análisis inmediato	4500 NO_2^- B
PO_4^{-3} (mg/l)	V	50	S	Análisis inmediato	
Coliformes totales (NMP/100ml)	V Estéril	200	S	Refrigerar $\leq 6^\circ$ C	9221 B

V: Vidrio, S: Simple

Fuente. Autores.

6.3. Elaboración del carbón activado granular a base del endocarpio de coco.

La filtración con carbón activado se desarrolló como indica Carrillo, V & Sánchez, N (2013), para la elaboración del carbón activado granular, se utilizó el endocarpio del coco como materia prima. Inicialmente se secó por 5 días al sol para eliminar humedad, luego se colocaron al fuego vivo hasta su carbonización; al estar completamente carbonizados, se roció agua destilada hasta dejarlo en brasas. Una vez se dejó reposar durante 15 minutos, se introdujeron a la mufla a una temperatura de 800°C durante una hora para su activación, al retirarlos de la mufla se dejaron reposar en el desecador. Como se muestra en la figura 14.



a) Secar al sol. b) Carbonizar al fuego vivo. c) Apagar el fuego con agua destilada. d) Activación a 800°C . e) Reposo en desecador.

Figura 14: Procedimiento carbonización y activación del carbón activado granular a base del endocarpio de coco.

Fuente. Autores.

6.4. Pruebas de tratamientos: Coagulación/ floculación con CAL-SODA y Filtración con carbón activado granular.

El procedimiento de la prueba de jarras con CAL-SODA, se basó del procedimiento planteado por Oliva, E (2005), donde aplican 3 mecanismos (coagulación, floculación y sedimentación), con el fin de reducir la dureza total, magnésica y cálcica propia de las aguas subterráneas. Para esto se realizó el montaje del equipo de jarras, donde se utilizó 6 beakers, cada una con 1 litro de la muestra, además, se preparó la dosis de coagulante (Cal-soda) de acuerdo a la concentración de dureza total inicial de la muestra de agua del pozo como se muestra en la tabla 3; en este caso se utilizó 250 mg de cal y 350 mg soda caustica en seco.

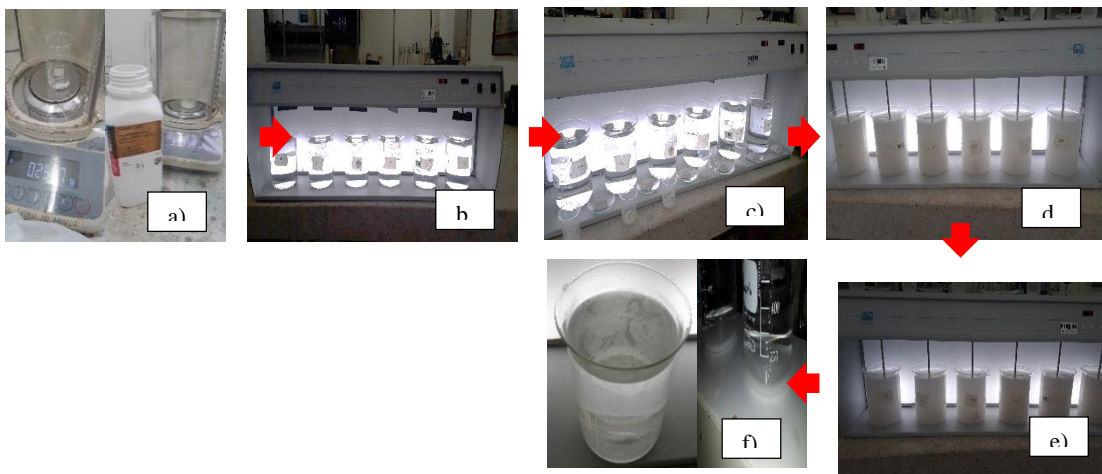
Tabla 3

Dosificación de la cal y la soda según cada valor de dureza total obtenido.

Dureza Total (mg/L)	Dosificación (mg/L)	
	Cal	Soda caustica
120 – 400	250	350
400 – 600	400	500
600 – 1200	500	700
1200 – 1800	700	1500
1800 – 2300	1100	2100

Fuente. (Oliva, E; 2005)

Una vez preparada las dosis, se procedió a iniciar el proceso de coagulación con una velocidad de 100 r.p.m, por 1 minuto, luego se bajó la velocidad a 45 rpm, por un tiempo de 15 minutos para la formación de flocs, y finalmente se bajó la velocidad a 0 rpm por 30 minutos para la sedimentación.



a) Pesaje de 2,5 g de cal y 3,5 g soda caustica. b) Llenado de las jarras. c) Adición de la cal y la soda. d) Mezcla rápida. e) Mezcla lenta. f) Sedimentación.

Figura 15: Procedimiento de prueba de jarras coagulación- floculación CAL-SODA.
Fuente. Autores.

Para la filtración con carbón activado, se procedió al pesaje 14 g, 16 g y 20 g del carbón activado, con el fin de elaborar 3 filtros, y así escoger el peso ideal de carbón activado con el cual se obtiene mayor porcentaje de remoción de dureza total. En la elaboración de los filtros se utilizó como base un Erlenmeyer y un embudo de vidrio. A continuación, se colocó en papel filtro dentro de los embudos, la cantidad de carbón estipulada y se procedió a filtrar 25 ml de la muestra del agua de pozo en cada uno de los filtros construidos. Cabe resaltar que se tomaron las mediciones de dureza total del agua cruda antes y después del tratamiento con el fin de comparar y calcular el porcentaje de remoción de cada uno de los filtros, utilizando la ecuación 1. (Valencia, Aragón & Romero, 2012).

$$\%Remoción = \frac{ConcentraciónAf - ConcentraciónEf}{ConcentraciónAf} * 100 \quad (Ec - 1)$$

*Af: Afluente; Ef: Efluente

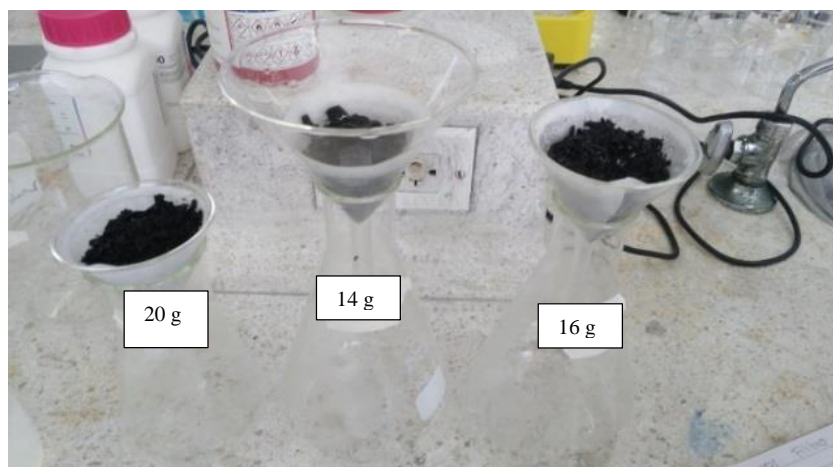


Figura 16: Filtración de las muestras de agua con carbón activado granular.
Fuente. Autores.

7. Análisis y discusión de resultados

7.1. Análisis y resultados agua subterránea

Una vez realizadas las pruebas de laboratorio, se arrojó los siguientes resultados de la caracterización inicial de una muestra del agua subterránea:

Tabla 4
Resultados de laboratorio del agua cruda.

						Valor máximo aceptable- Resolución 2115 2007
Parámetro	Unidades	A1	A2	A3	promedio	
Unidades						
Nefelométri						
Turbiedad	cas de	0,334	0,316	0,266	0,305	2
	turbidez					
	(NTU)					
Color	Unidades	10	10	10	10	15

de Platino						
Cobalto						
(UPC)						
pH	Unidades de pH	7,17	7,244	7,242	7,22	6,5 – 9
Alcalinidad total	mg/L CaCO3	392	437,6	346,4	392	200
Dureza total	mg/L CaCO3	404,8	369,6	396,8	390,4	300
Dureza cálcica	mg/L CaCO3	254,4	222,4	312	262,93	-
Dureza magnésica	mg/L CaCO3	150,4	147,2	84,8	127,45	-
Sólidos totales	mg/L CaCO3	807,6	1185,6	767,6	920,27	-
Sólidos disueltos	mg/L CaCO3	876,8	1132	1100,4	1036,4	-
Conductividad	µS/cm	423,9	488,4	1693,6	868,63	1000
NO3(mg /l)	NO3					
	3					
	mg/L	0,0068	No detectable	0,001	0,0039	10
	N					
	mg/L	0,0016	No detectable	0,004	0,0028	-
NO2(mg /l)	NO2					
	2					
	mg/L	0,0112	0,0046	0,007	0,0076	0,1
	N					
	mg/L	0,0034	0,0152	0,0222	0,0136	-
PO4(mg /l)	PO4					
	4					
	mg/L	0,6	19,075	0,428	6,701	0,5
	P					
	mg/L	0,198	6,275	0,138	2,20	-

Colifor						< de 1
mes	NMP/100mL	<1.8	<1.8	<1.8	<1.8NMP/10	microorgani
totales		NMP/100mL	NMP/100mL	NMP/100mL	0mL	smo en 100
						cm3

Fuente. Autores.

*A1: Alícuota 1, A2: Alícuota 2, A3: Alícuota 3

Comparando los resultados de la tabla 7.1-1 con la resolución 2115 de 2007, en donde se señala las características y valores máximos aceptables para la calidad del aguade consumo humano. El color aparente, turbiedad y pH se encuentran por debajo de los límites aceptables por la resolución (ver tabla 7.1-1), debido a que se obtuvo valores de 10 UPC, 0,305 NTUy 7,22 respectivamente.De igual forma, como se muestra en la tabla 7.1-1el valor obtenido en nutrientes como Nitritos es de 0,0076 NO_2^- mg/L, y un promedio de Nitratos de 0,0039 NO_3^- mg/L; teniendo en cuenta que el valor máximo aceptable es 0,1 NO_2^- mg/L y 10 NO_3^- mg/Lrespectivamente, dichos parámetros son admisibles por la norma.

En cuanto al análisis microbiológico, no se encontró presencia de microorganismos patógenos en el agua del pozo de la Universidad de la Costa.

Ahora bien, comparando los resultados de alcalinidad y dureza total, se reportan valores inaceptables por la resolución 2115: 2007 , ya que para la alcalinidad el valor máximo permisible es 200 mg/L y el de la dureza total 300 mg/L y como se observa en la tabla 7.1-1, el valor promedio fue de 392 mg/L y 390,4 mg/L respectivamente , esto se puede atribuir a la procedencia del agua ya que la filtración de lluvia al atravesar varias capas de sólidos y rocas de la tierra, disuelve algunas sustancias minerales dando como consecuencia la dureza (Oliva, 2005). Para la dureza cálcica y magnésica se obtuvo promedios de 262,93 y 127,45mg/L $CaCO_3$

respectivamente, la presencia de altos valores de dureza cálcica y magnésica se debe al paso del agua subterránea a través de la caliza disolviendo los compuestos de calcio y magnesio como lo menciona Rigola (1999).

7.2 Análisis y resultados de agua del servicio público

Una vez finalizada la caracterización de agua potable suministrada por la empresa Triple A, se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 5

Resultados de laboratorio del agua se servicio público de agua potable Triple A.

Parámetro	Unidades	A1	A2	A3	Promedio	Valor máximo aceptable- Resolución 2115 2007
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbidez (NTU)	0,37	0,29	0,27	0,31	2
Color	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	5	5	5	5	15
Ph	Unidades de Ph	6,45	6,45	6,45	6,45	6,5 – 9
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	72	64	68	68	200
Dureza total	mg/L CaCO ₃	80	72	60	70,67	300
Dureza cálcica	mg/L CaCO ₃	52	48	48	49,33	-
Dureza magnésica	mg/L CaCO ₃	28	24	12	21,33	-
Cloro residual	mg/L	2	2	2	2	0,3-2,0
Conductividad	(µsiemens/cm)	104,5	103,9	104,2	104,2	1000

Fuente. Autores.

*A1: Alícuota 1, A2: Alícuota 2, A3: Alícuota 3

Cabe destacar que las pruebas se realizaron como verificación de la calidad de sus parámetros, ya que esta agua es resultado de un tratamiento de potabilización por parte de la empresa Triple A, los resultados obtenidos en el laboratorio (ver tabla 7.2-1) corroboran que el agua potable suministrada cumple con los valores máximos permisibles de la legislación colombiana para consumo humano. No requiere de ningún tratamiento adicional.

7.3. Análisis y resultados agua tratada

Posterior a la caracterización inicial del agua y su filtración por el lecho de carbón activado se obtienen los siguientes parámetros:

Tabla 6

Resultados de laboratorio del agua tratada después de filtración con carbón activado.

FILTRACIÓN CARBON ACTIVADO (F)						
PARÁMETRO	UNIDADES	W1	W2	W3	Promedio	Valor máximo aceptable-Resolución 2115 2007
Unidades						
Turbiedad	Nefelométricas de turbidez (NTU)	4,75	5,22	5,37	5,11	2
Color	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	20	20	20	20,00	15
pH	Unidades de pH	8,79	9,19	9,9	9,29	6,5-9
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	480	480	500	486,67	200
Dureza total	mg/L CaCO ₃	360	368	380	369,33	300
Dureza cálcica	mg/L CaCO ₃	160	180	184	174,67	-
Dureza	mg/L CaCO ₃	200	188	196	194,67	-

magnésica						
Sólidos totales	mg/L CaCO ₃	714	844	912	823,33	-
Sólidos disueltos	mg/L CaCO ₃	502	554	572	509,33	-
Conductividad	(µsiemens/cm)	793	794	816	801,00	1000

Fuente. Autores.

*W1:20g de carbón; W2: 16g de carbón; W3: 14g de carbón

En la tabla 7.3-1 se observa que a partir de filtración con 20g de carbón activado solo los parámetros de pH y conductividad se encuentran por debajo de los límites permisibles, por el contrario de los otros filtros. Según autores como Sevilla, (2010); Espinal, (2014); indican que el carbón activado es un eficiente removedor de olores, sabores, materia orgánica, cloro residual, minerales y dureza, por tal motivo se considera que la metodología implementada por los autores Carrillo, V & Sánchez, N (2013), no arrojo los mejores resultados.

Por otra parte, la técnica coagulación/floculación con Cal- Soda denota valores de dureza total final menores en comparación con lo obtenido en la caracterización inicial, cumpliendo con la resolución, sin embargo, se vio afectado los demás parámetros como se muestra en la tabla 7, los cuales se encuentran por encima de los límites máximos permisibles.

Tabla 7

Resultados de laboratorio del agua tratada después de prueba de jarras con cal y soda caustica.

PRUEBA DE JARRAS CAL-SODA (C-F)						
PARÁMETRO	UNIDADES	A1	A2	A3	Promedio	Valor máximo aceptable- Resolución 2115 2007
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbidez (NTU)	5,14	4,34	4,94	4,81	2
Color	Unidades de Platino	20	20	20	20,00	15

Cobalto (UPC)						
pH	Unidades de pH	11,76	11,9	11,83	11,83	6,5-9
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	492	496	500	496,00	200
Dureza total	mg/L CaCO ₃	60	64	60	61,33	300
Dureza cálcica	mg/L CaCO ₃	44	40	36	40,00	-
Dureza magnésica	mg/L CaCO ₃	16	24	24	21,33	-
Sólidos totales	mg/L CaCO ₃	6040	7134	5780	6318,00	-
Sólidos disueltos	mg/L CaCO ₃	5786	5232	5960	5659,33	-
Conductividad	µS/cm	1109	1116	1133	1119,33	1000

Fuente. Autores.

*A1: Alícuota 1, A2: Alícuota 2, A3: Alícuota 3.

Debido a los resultados anteriores se probó experimentalmente con la unión de las dos técnicas obteniendo los resultados que se muestran en las tablas 8, 9 y 10. Se observa que los parámetros de pH y alcalinidad son los únicos que no cumplen con la normatividad antes mencionada.

Tabla 8

Resultados de laboratorio del agua tratada después de prueba de jarras con cal y soda caustica y filtración con 14 gramos de carbón activado.

PRUEBA DE JARRAS CAL-SODA Y FILTRACIÓN CON 14 G DE CARBÓN ACTIVADO (C-F + F14)						
PARÁMETRO	UNIDADES	A1	A2	A3	Promedio	Valor máximo aceptable- Resolución 2115 2007
Unidades						
Turbiedad	Nefelométricas de turbidez (NTU)	0,90	0,88	0,89	0,89	2

Color	Unidades de Platino	20,00	20,00	20,00	20,00	15
	Cobalto (UPC)					
pH	Unidades de pH	13,40	13,10	13,25	13,25	6,5-9
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	484,00	500,00	487,00	490,33	200
Dureza total	mg/L CaCO ₃	104,00	104,00	189,00	132,33	300
Dureza cálcica	mg/L CaCO ₃	60,00	60,00	61,00	60,33	-
Dureza magnésica	mg/L CaCO ₃	44,00	44,00	128,00	72,00	-
Sólidos totales	mg/L CaCO ₃	7162,00	7220,00	7235,00	7205,67	-
Sólidos disueltos	mg/L CaCO ₃	3880,00	3960,00	3840,00	3893,33	-
Conductividad	(µsiemens/cm)	130,50	140,00	148,00	139,50	1000

Fuente. Autores.

*A1: Alícuota 1, A2: Alícuota 2, A3: Alícuota 3.

Tabla 9

Resultados de laboratorio del agua tratada después de prueba de jarras con cal y soda caústica y filtración con 16 gramos de carbón activado.

PRUEBA DE JARRAS CAL-SODA Y FILTRACIÓN CON 16 G DE CARBÓN ACTIVADO (C-F +F16)

PARÁMETRO	UNIDADES	A1	A2	A3	Promedio	Valor máximo
						aceptable-
						Resolución 2115
						2007
Unidades						
Turbiedad	Nefelométricas de turbidez (NTU)	0,65	0,81	0,56	0,67	2
Color	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	20,00	20,00	20,00	20,00	15
pH	Unidades de pH	13,10	12,90	12,00	12,67	6,5-9
Alcalinidad	mg/L CaCO3	480,00	488,00	489,00	485,67	200
Dureza total	mg/L CaCO3	100,00	100,00	180,00	126,67	300

Dureza cálcica	mg/L CaCO ₃	68,00	60,00	64,00	64,00	-
Dureza magnésica	mg/L CaCO ₃	32,00	40,00	116,00	62,67	-
Sólidos totales	mg/L CaCO ₃	5564,00	5700,00	5568,00	5610,67	-
Sólidos disueltos	mg/L CaCO ₃	3778,00	3620,00	3780,00	3726,00	-
Conductividad	µS/cm	120,20	120,50	120,55	120,42	1000

Fuente. Autores.

*A1: Alícuota 1, A2: Alícuota 2, A3: Alícuota 3.

Tabla 10

Resultados de laboratorio del agua tratada después de prueba de jarras con cal y soda caustica y filtración con 20 gramos de carbón activado.

PRUEBA DE JARRAS CAL-SODA Y FILTRACIÓN CON 20 G DE CARBÓN ACTIVADO (C-F +F 20)						
PARÁMETRO	UNIDADES	A1	A2	A3	Promedio	Valor máximo aceptable- Resolución 2115 2007
Unidades						
Turbiedad	Nefelométricas de turbidez (NTU)	0,53	0,42	0,44	0,46	2
Color	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	10,00	10,00	10,00	10,00	15
pH	Unidades de pH	12,90	12,90	12,75	12,85	6,5-9
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	480,00	488,00	487,00	485,00	200
Dureza total	mg/L CaCO ₃	80,00	84,00	86,00	83,33	300
Dureza cálcica	mg/L CaCO ₃	44,00	52,00	52,00	49,33	-
Dureza magnésica	mg/L CaCO ₃	36,00	32,00	34,00	34,00	-
Sólidos totales	mg/L CaCO ₃	4634,00	4500,00	4636,00	4590,00	-
Sólidos disueltos	mg/L CaCO ₃	3032,00	3000,00	3020,00	3017,33	-
Conductividad	µS/cm	120,10	120,20	121,00	120,43	1000

Fuente. Autores.

*A1: Alícuota 1, A2: Alícuota 2, A3: Alícuota 3.

Dados los resultados anteriores se obtuvo en el porcentaje de remoción de dureza total y cálcica de los cuatro tratamientos evaluados a partir de la **Ec-1**. Se puede observar en la tabla 7.3-7 los tratamientos que obtuvieron un mayor porcentaje de remoción de dureza total fueron, **C-F** y **C-F+ F20** con un 85,64% y 80,48% respectivamente. Así mismo fueron los tratamientos con mayor porcentaje de remoción de dureza cálcica con un 81,71% y 73,33% respectivamente.

Por otro lado, el tratamiento de solo filtración con carbón activado fue el que obtuvo menor porcentaje de remoción tanto en la dureza total como en la dureza cálcica con un 7,67% y un 24,71% respectivamente.

Tabla 11

Porcentajes de remoción de dureza total y dureza cálcica.

PORCENTAJES DE REMOCIÓN DUREZA						
Tratamiento	Dureza total inicial	Dureza total final	% Remoción dureza total	Dureza cálcica inicial	Dureza cálcica final	% Remoción dureza cálcica
F	400	369	7,67	232	174,67	24,71
C-F	404	58	85,64	219	40	81,71
C-F + F14	420	104	75,24	180	60	66,67
C-F + F16	420	100	76,19	180	64	64,44
C-F + F 20	420	82	80,48	180	48	73,33

Fuente. Autores.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el desarrollo del presente proyecto, la propuesta técnica más eficiente para la remoción de dureza y estabilización de parámetros

pertenecientes al agua subterránea de la Universidad de la Costa, consta de seis procesos como se observa en la figura 17.

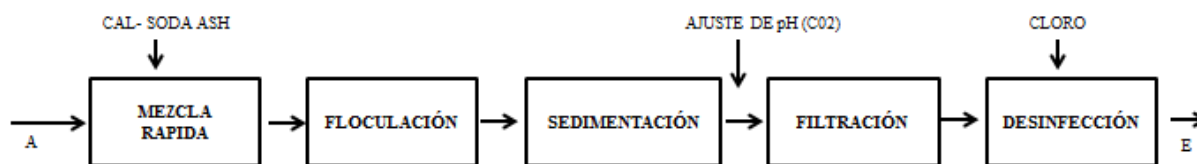


Figura 17. Etapas del tratamiento propuesto.
Fuente. Romero, 2006.

En la figura 7.3-1 se muestra las etapas del tratamiento propuesto; inicia con el proceso de mezcla rápida con la adición de los reactivos de Cal y Soda Caustica a 100 rpm por 1 minuto, seguidamente de una mezcla lenta o floculación a 45 rpm por 15 minutos y sedimentación a 0rpm durante 30 minutos; debido a la variación de pH a básico al utilizar los anteriores reactivos se hace necesario un ajuste de este parámetro, como lo indica Marín (2004), para disminuir el pH se aplica ácido sulfúrico como buffer para plantas pequeñas, a plantas con flujos de 1,828 m³/día se emplea cilindros de dióxido de carbono y para plantas muy grandes se emplea carbono líquido. Es decir, que para este caso se implementaría ácido para el ajuste. Posteriormente estaría la etapa de filtración con carbón activado granular a base del endocarpo de coco y finalmente para garantizar el exterminio de organismos patógenos a pesar de que no se encontró rastros de coliformes durante las pruebas, se sugiere la adición de hipoclorito de sodio como desinfección.

8. Análisis de prefactibilidad

8.1.Situación actual

La Universidad de la Costa actualmente consta con dos fuentes hídricas para su abastecimiento, un pozo de agua subterránea y el servicio público de acueducto de la ciudad por parte de la empresa Triple A; el primero suministra agua a los baños y actividades de riego, mientras el segundo cubre las áreas de laboratorios, cocina y cafetería.

De acuerdo al histórico del año 2015 al 2018 (ver tabla 12), se refleja que mensualmente hay un consumo promedio de 648m³ de agua subterránea y 1705m³ de agua del servicio público con un total de 2353,67 m³ de agua en toda la institución.

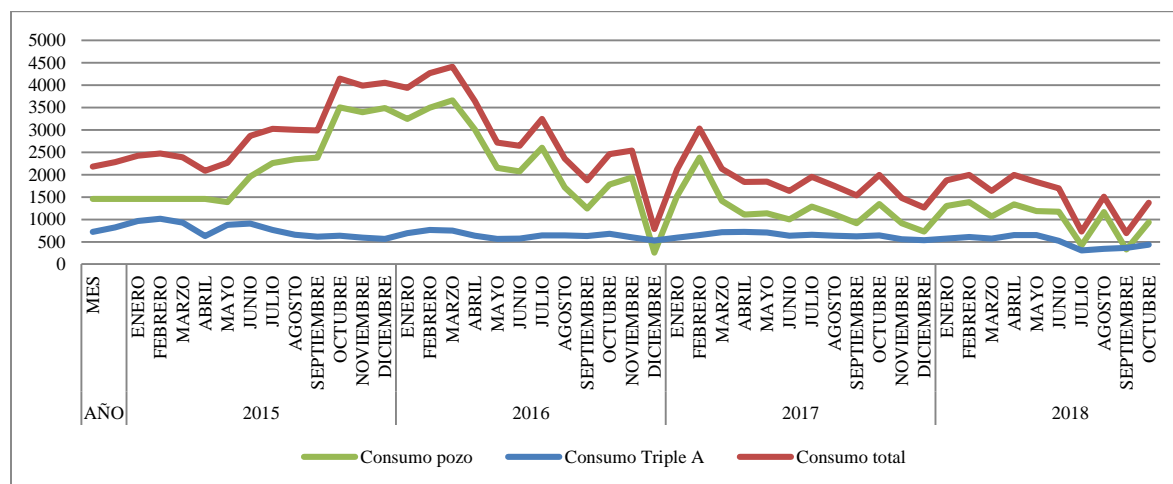


Figura 18: Histórico de consumo de agua de la Universidad de la costa 2015-2018.
Fuente. Autores.

Tabla 12

Consumo promedio, máximo y mínimo del pozo y del servicio de triple A.

Consumo (m ³)	Pozo	Triple A	Total
Promedio	648,5	1705,17	2353,67
Máximo	1018	3660	4408
Mínimo	307	255	694

Fuente. Autores.

La institución tiene un gasto mensual con la prestación del servicio de Triple A; de acuerdo a la información suministrada por el departamento de calidad de la Universidad de la costa, el

valor del m³ cancelado mensualmente en este periodo de tiempo fue de \$ \$1.643 pesos, con un promedio de \$ 1.330.177,93 de pesos al mes y al año de \$ 15.962.135,14 pesos.

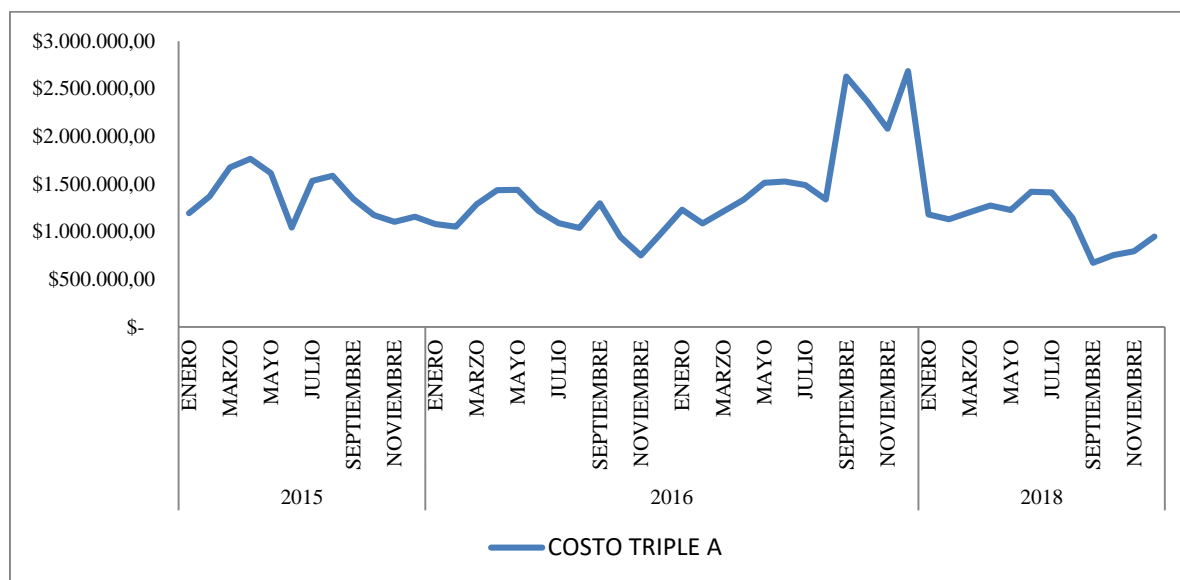


Figura 19: Costos mensuales por el servicio de acuerdo con Triple A 2015-2018.
Fuente. Autores.

Tabla 13

Consumo promedio, máximo y mínimo del pozo y del servicio de triple A.

Año	Promedio costos mensual	Promedio costo anual
2015	\$ 1.379.988	\$ 16.559.856
2016	\$ 1.135.472	\$ 13.625.669
2017	\$ 1.708.043	\$ 20.496.515
2018	\$ 1.097.208	\$ 13.166.501
Promedio	\$ 1.330.178	\$ 15.962.135

Fuente. Autores.

Dentro de los costos asociados al pozo se encuentra inicialmente el Programa de uso eficiente y ahorro de agua (PUEAA), donde hacen parte todas las actividades, proyectos y acciones ejecutadas por la universidad, encaminadas a la gestión ambiental; por otro lado, el seguimiento y evaluación, gaceta y concesión otorgados por la autoridad ambiental y el mantenimiento preventivo; cabe resaltar que estos costos se presentan en distintos periodos de tiempo, como se observa en la tabla 14

Tabla 14

Descripción gastos generados actualmente por el uso del pozo de la Universidad De La Costa.

Descripción	Costo	Periodo
PUEAA	\$ 1.589.500	4 años
Seguimiento y evaluación	\$ 2.879.428	3 años
Gaceta	\$ 343.875	3 años
Concesión	\$ 2.879.000	3 años
Mantenimiento	\$ 10.000.000	6 meses

Fuente. Desarrollado por autores a partir de información obtenida del Departamento de Calidad y Desarrollo de la Universidad.

Para facilitar el cálculo de costos anuales en recurso hídrico, se determinó los gastos al año que implica al pozo teniendo en cuenta la tabla 15

Tabla 15

Proyección de costos anual del pozo situación actual.

Descripción	Periodo	Costo	Costo total
Seguimiento y evaluación	1 año	\$ 959.809	\$
Gaceta		\$ 114.625	22.431.476
Tiempo del permiso		\$ 959.667	
Mantenimiento		\$ 20.000.000	
PUEAA		\$ 397.375	

Fuente. Autores.

En la actualidad la Universidad de la Costa tiene un gasto anual aproximado de \$ 38.393.611 pesos para abastecer totalmente la institución, siendo esto la suma de los costos por el pago de la factura del servicio de agua potable más el costo anual equivalente por el pago de permisos y mantenimiento del pozo.

8.2. Alternativas de abastecimiento hídrico

8.2.1. Uso exclusivo del servicio público de Triple A

La Sociedad de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Barranquilla S.A. E.S.P. (Triple A), opera en 15 municipios del departamento del Atlántico, con el servicio de potabilización, distribución y comercialización de agua, tomando como fuente de captación al río Magdalena

(Triple A. s,f). De acuerdo al consumo total requerido por la universidad (ver anexo- tabla 12-4), se proyectó sus costos si solo se contara con este servicio para toda la institución, arrojando un valor a pagar de \$ 4.361.309,58 pesos/ mes y \$ 52.335.715,00 pesos /año. Este cuenta el costo del m³ actual cancelado por la universidad.

8.2.2. Uso exclusivo del agua subterránea

Para el análisis de esa alternativa, se tuvo en cuenta inicialmente si el volumen total de agua requerido por la universidad sobrepasaba el limite concesionado (3660m³), teniendo en cuenta el consumo total de la institución en los últimos cuatro años, obteniendo como resultado que solo en el mes de diciembre del 2015 y en los cinco primeros meses del 2016 se incrementó el consumo (figura 20) debido a que inició la construcción del bloque 11.

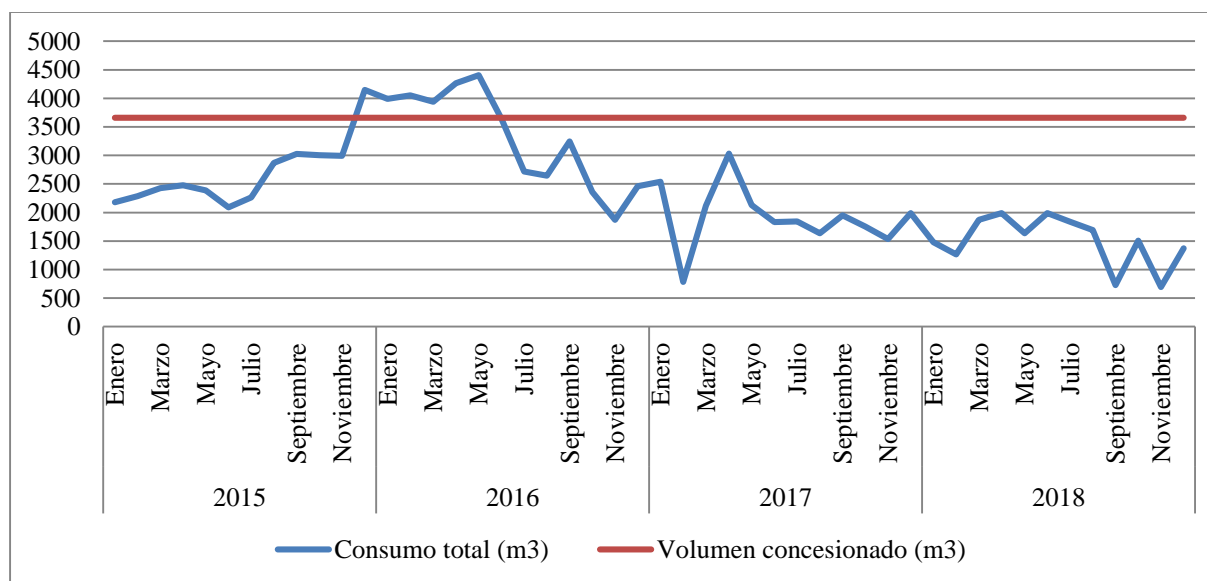


Figura 20. Histórico de consumo agua de pozo 2015-2018.
Fuente. Autores.

En base a los parámetros de calidad para el consumo humano establecidos por la legislación Colombiana vigente (Resolución 2125: 2007), se hace necesaria la implementación de un sistema de tratamiento óptimo para ser la fuente exclusiva de abastecimiento de la universidad.

Se proyectó sus costos si solo se contara con este servicio para toda la institución, arrojando un valor a pagar de \$39.932.276/año, que incluye las actividades anteriormente mencionadas en la tabla 16 y adicionalmente los costos asociados al tratamiento escogido (insumos) (tabla 17), sin tener en cuenta diseño, construcción y operación.

Tabla 16

Proyección de costos anual con uso exclusivo del pozo.

Servicio	Descripción	Periodo	Costo	Costo total
Pozo	Seguimiento y evaluación		\$ 959.809	
	Gaceta		\$ 114.625	
	Tiempo del permiso	1 año	\$ 959.667	\$ 1.476.699.476
	Tratamiento		\$ 1.454.268.000	
	Mantenimiento		\$ 20.000.000	
	PUEAA		\$ 397.375	

Fuente. Autores.

Tabla 17

Proyección de costos por insumos para el tratamiento del agua del pozo.

Insumos	Cantidad (Kg)	Consumo máximo de agua mensual (m3)	Precio unitario 1kg	Precio total 1 m3	Total costo al mes	Total costo al año
Carbón activado	1	2353	\$ 9.500	\$ 9.500	\$ 9.500	\$1.454.268.000
Cal	2,5		\$ 1.000	\$ 2.500	\$ 9.115.000	
Soda caustica	3,5		\$ 14.000	\$ 49.000	\$178.654.000	

Fuente. Autores.

8.3 Ventajas y desventajas de alternativas

Tabla 18

Ventajas y desventajas de alternativas para abastecer de agua potable la institución

Uso exclusivo	Ventajas	Desventajas
Triple A	<ul style="list-style-type: none"> • Se conoce la procedencia del agua • Se garantiza la calidad • No se requiere tratamiento • No genera costos adicionales al 	<ul style="list-style-type: none"> • Interrupción del servicio si hay mantenimientos del sistema de acueducto • Posibles lecturas erróneas en el consumo que generan altos costos.

	del recibo	<ul style="list-style-type: none"> • Posibles interrupciones por agentes externos (tuberías rotas) • Requiere tratamiento • No se conoce la procedencia del agua • Incertidumbre legal (Se limita al volumen de agua concesionado) • Genera incrustaciones en los sistemas de tuberías y tratamiento por dureza del agua. • Se puede ver afectado el recurso natural. • Posibles multas. • Seguimiento constante
Pozo de agua	<ul style="list-style-type: none"> • Generación empleos • No requiere pago al servicio publico 	

Fuente: Autores.

Según la tabla anterior, el servicio de Triple A es la opción más viable por las ventajas que le representan, aunque presenta desventajas, se pueden mitigar o prevenir, como por ejemplo: para la interrupción del servicio por mantenimientos o agentes externos se puede implementar un tanque elevado como contingencia; y las deficiencias en las lecturas con supervisión; por otro lado, el abastecimiento del pozo conlleva limitaciones como los requerimientos ante las autoridades ambientales e incertidumbre legal, las posibles multas por incumplimiento de la concesión, constante evaluación y seguimiento y demás requerimientos obligatorios.

8.3.Alternativa de implementación

Una vez, analizado las ventajas, desventajas y costos de las alternativas que tiene la institución como abastecimiento hídrico, se identificó que actualmente la Universidad tiene un gasto aproximado anual de \$38.082.204 de pesos para su abastecimiento total; mientras que si tuviera uso exclusivo del agua de pozo con su respectivo tratamiento se proyecta un valor de \$ 2.275.668.976 pesos al año sin tener en cuenta inversión inicial de construcción y operación; por otro lado si tuviera uso exclusivo del servicio de Triple A se proyecta un gasto anual de \$52.335.715 de pesos. Teniendo en lo anterior y que la universidad debería contar con un

sumisitos de agua potable para sus redes sanitarias, la opción más viable técnica y económicamente es la de abastecerse por completo con el servicio público de Triple A.

9. Conclusiones

Comparando los resultados obtenidos de la caracterización inicial del agua del pozo con la resolución 2115 de 2007, por medio de la cual se señalan características y valores máximos aceptables para la calidad del agua de consumo humano, se obtuvo que los parámetros color aparente, turbiedad, pH, nutrientes, conductividad y coliformes totales cumplen con los límites aceptables por la resolución. Sin embargo, dureza total y alcalinidad total no cumplen valores máximos aceptables para la calidad del agua para consumo humano. Esto se asocia a la presencia de minerales tales como el Calcio y Magnesio característicos de las aguas subterráneas.

Se presentó altos porcentajes de remoción de dureza total en la evaluación de los tratamientos de coagulación/ floculación con cal-soda + filtración con 20 g de carbón activado con un 85,64% y 80,48% respectivamente.

Se obtuvo que a mayor cantidad de carbón activado a base de endocarpio de coco, mayor será la remoción de la dureza total.

Se determinó que el mejor sistema de tratamiento para el agua de pozo de la Universidad de la Costa es coagulación / floculación con cal-soda, ajuste de pH, filtración con de carbón activado y desinfección con hipoclorito de sodio, sin embargo, no es económicamente rentable.

Finalmente, teniendo en cuenta el análisis de prefactibilidad se identificó que actualmente la Universidad tiene un gasto aproximado anual de \$38.082.204 de pesos para su abastecimiento total; mientras que si tuviera uso exclusivo del agua de pozo con su respectivo tratamiento se

proyecta un valor de \$ 2.275.668.976 pesos al año sin tener en cuenta inversión inicial de construcción y operación; por otro lado si tuviera uso exclusivo del servicio de Triple A se proyecta un gasto anual de \$52.335.715 de pesos. Teniendo en lo anterior y que la universidad debería contar con un suministro de agua potable para sus redes sanitarias, la opción más viable técnica y económicamente es la de abastecerse por completo con el servicio público de Triple A.

10. Recomendaciones y limitaciones

Dado que no existe suficiente información sobre el pozo de la Universidad se recomienda realizar estudios de niveles de caudal, mapas sobre la red hidráulica del agua del pozo y estudios sobre análisis de la capacidad del sistema de abastecimiento debido al crecimiento de la institución educativa.

Debe realizarse el control del nivel freático del pozo con el objeto de observar el comportamiento, así como también su evolución en tiempo y espacio.

Dado que se utiliza el método de floculación- coagulación con cal/soda se ven afectados algunos parámetros del agua, por tanto, se debería realizar un ajuste de pH y alcalinidad antes de realizar el proceso de filtración.

A pesar que no se encontró presencia de microorganismos se recomienda realizar la desinfección del agua del pozo y asegurar el exterminio de microorganismos patógenos

A partir de que las metodologías de los tratamientos propuestos no brindaron resultados significativos, se recomienda consultar y evaluar diferentes técnicas y autores para el ablandamiento del agua subterránea; de igual forma ejecutar más pruebas con los tipos de tratamiento del presente estudio.

Para la implementación de un sistema de tratamiento del agua de pozo en la Universidad de la Costa, se deben considerar los materiales de ajuste de pH y cloración, de igual forma los costos de construcción, operación y mantenimiento del sistema de tratamiento.

No se pudo hacer ejecutar un mayor número de pruebas por la falta de disponibilidad del laboratorio de la Universidad.

No se realizó más prueba de filtración con el carbón activado, debido a que se presentó muchos inconvenientes con su elaboración (Lugar de calcinación y activación).

Una de las limitaciones fue que no se estimó la granulometría y porosidad del carbón debido a ciertos inconvenientes presentados en el laboratorio en la fase experimental

11. Referencias

- Aldaco García, R. (2005). Control de fluoruros con recuperación de producto. Universidad de Cantabria.
- AMBQ (Área metropolitana de Barranquilla). Plan de gestión integral de residuos sólidos. Diagnosticogeneral.Cap 1. (2005).
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) & Water Environment Federation (WEF); Standard Methods for the examination of water and wastewater; 21st edition; USA; 2005.
- Arango, María Cecilia, Álvarez, Luisa Fernanda, Arango, Gloria Alexandra, Torres, Orlando Elí, & Monsalve, Asmed de Jesús. (2008). Calidad del agua de las quebradas la cristalina y la Risaralda, San Luis, Antioquia. *Revista EIA*, (9), 121-141. Retrieved June 14, 2019.
- Auge, M. (2007). Agua fuente de vida. *Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires*.
- Babor. (1996). Química general. Editorial Limusa.
- Bravo Moreira, K. I., Moreno, G., & Rubén, A. (2017). Eficiencia del carbón activado procedente del residuo agroindustrial de coco (*Cocusnucifera*) para remoción de contaminantes en agua (Bachelor'sthesis, Calceta: ESPAM).
- Caraballo, M. P. C., & Xavier, J. M. (2012). Manual de agua Subterranea. P-34.
- Carrillo, V. Y.& Sánchez, N. E. (2013). Elaboración de un filtro a base de carbón activado obtenido del endocarpo de coco con el propósito de reducir la dureza en el agua potable (Doctoral dissertation, Universidad de El Salvador).
- Casero Rodriguez, D. (2008). Módulo IV: Abastecimientos y Saneamientos Urbanos. eoi Escuela de Negocios.

Chavarro, D. A. Diseño de una planta de tratamiento de agua potable de 2 lts/s para una población de 750 habitantes.

Clarimex S.A. (1999), Carbones activados. Guía del usuario, corporación Clarimex S.A. México.

Cobos, O. F. H., García, L. C. F., & Londoño, J. F. A. (2009). Estudio de la biosorción de cromo con hoja de café. *Ingeniería e Investigación*, 29(2), 59-64.

Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA). Análisis del sector de agua potable y saneamiento en Colombia. Plan Regional de Inversiones en Ambiente y Salud. Serie Análisis No 11.

Díaz-Pulido, A. P., Hernández, N. C., Muñoz-Moreno, D., Olaya-González, W. R., Perilla-Castro, C., Sánchez-Ojeda, F., & Sánchez-González, K. (2009). Desarrollo sostenible y el agua como derecho en Colombia. *Revista Estudios Socio-Jurídicos*, 11(1), 84-116.

Durango, L. C. (2009). Climatología de los principales puertos del Caribe Colombiano. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. Cartagena de Indias. DT Boletín Científico CIOH, 4-10.

E. W. Rice et. Al. (2012). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22 ed., American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation, 2012, pp. 2-1, 2-44 .

Emrich, W. (1985). Handbook of Charcoal Making.

Erice, M. V. (2012). Protección de las aguas subterráneas en el derecho de aguas español. Universidad de Navarra.

Espinal Heredia, G. B. (2017). Eficiencia del carbón activado a base de cascara de coco en el tratamiento de aguas residuales domésticas en el AA. HH. 10 de octubre, distrito de San Juan de Lurigancho, Lima, año 2017.

- Espinal, C., Ocampo, D., & Rojas, J. (2014). Construcción de un prototipo para el sistema de reciclaje de aguas grises en el hogar. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Fernandez, R.A: Castillo, E.R; Rey, M.R; Garcia, F.I & Huertemendia, M.M (2005). Obtencion carbones activados micro porosos para la purificación de gases, Convención Cubana de ciencias de la tierra, Congreso Cubano de minería, Habana, Cuba.
- Fernández-Rodríguez, M., Nfundiko Christian, B., Guardado-Lacaba, R., & Almaguer Carmenate, Y. (2018). Evaluación hidroquímica de las aguas del río Cayo Guam, Moa, Cuba. *Minería y Geología*, 34(3), 268-288.
- Fiotto. S, Gonta. S, Gonzalez. M & Torres. N (2008). Gestión y Tratamiento de Agua Subterránea Caso Planta Fraccionadora de Gas Polo Petroquímico Bahía Blanca. Universidad Tecnológica Nacional- Argentina.
- Flores, E., Armienta, A., Micete, S., & Valladares, M. R. (2009). Tratamiento de Agua para Consumo Humano con Alto Contenido de Arsénico: Estudio de un Caso en Zimapan Hidalgo-México. *Información tecnológica*, 20(4), 85-93.
- Foster, S., Kemperl, K., Tuinhof, A., Koundouri, P., Nanni, M., & Garduño, H. (2005). Amenazas naturales a la calidad del agua subterránea. Washington. Banco Mundial-GW MATE.
- Fuentes Yagüe, J. L. (1993). Aguas Subterráneas. España. Disponible: https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1992_01.pdf
- García López, R. A., & Granillo Oporta, Y. A. (2017). Evaluación de las condiciones operacionales en el proceso de preparación de carbón activo de cáscara de naranja valencia (*citrus sinensis* linnobsbeck), laboratorios de química UNAN-Managua, II

- semestre 2016 (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua).
- Groso Cruzado, G. (1997). El carbon activado granular en el tratamiento del agua. Aconcagua ediciones y publicaciones. Madrid.
- Gutiérrez Cuba, C. (2000). Diseño y modelamiento de un sistema de lecho fluidizado para ablandamiento con cal.
- Inglezakis, V. J., Doula, M. K., Aggelatou, V., & Zorpas, A. A. (2010). Removal of iron and manganese from underground water by use of natural minerals in batch mode treatment. *Desalination and Water Treatment*, 18(1-3), 341-346.
- Instituto nacional de normalización (INN). (2007). Agua potable- Fuentes de abastecimiento y obras de captación- Parte 1: Captación de aguas superficiales. Disponible: http://www.siss.gob.cl/586/articles-6083_recurso_1.pdf
- Legrand, L.; Leroy, P. & Ellis, H. (s.f). *Prevention Of Corrosion and Scaling in Water Supply Systems*.
- López, A. B., Ramos, J. A., Moran, R. J., Cardona, B. A. & Hernández, G. G. (2013)- “Origen de la calidad del agua del acuífero colgado y su relación con los cambios de uso de suelo en el Valle de San Luis Potosí” *Sociedad Geologica Mexicana*, 65 (1) pp9-26.
- Luna, D., González, A., Gordon, M., & Martín, N. (2007). Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco. *Contacto S*, 64(10), 39-48.
- Madurga, R. L. (2001). El necesario aprovechamiento sostenible de las aguas subterráneas en España. In *Horizontes culturales: las fronteras de la ciencia: 2000* (pp. 155-166). Espasa Calpe.

MAG, PNUDA & UCP. Provisión de plantas de potabilización de aguas para comunidades indígenas del Chaco Paraguayo. Paraguay.

Manual, D. C. A. Máster en ingeniería del agua. EU. Politécnica. U. Sevilla.

Marin, T. D. J. V. (2004). Exploracion de posibilidades para proponer un tren de tratamiento para remocion de dureza que logre la optimizacione tecnica y economica del proceso.

Martinez, G.J. (2012). Evaluación de dos agentes ablandadores de agua y su mezcla para ajustar el índice de langelier en recirculación de aguas de enfriamiento y estabilizar parámetros químicos en calderas de vapor. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

Millán, F., Mathison, J., Alvares, M., & Jarbough, W. (2003). Estudio comparativo de la dureza del agua en el estado Mérida y algunas localidades del centro y occidente de Venezuela. Ciencia e Ingeniería, 24(1), 39-46.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (MIMAM), El Libro Blanco del Agua en España, Secretaría de Estado para Aguas y Costas, Madrid, 2000, 900 págs. aprox.

Miyake Y, Yokoyama T, Yura A, Iki M, Shimizu T. Ecological association of water hardness with the prevalence of childhood atopic dermatitis in a Japanese urban area. Environ Res 2004; 94:33-37.

Navarro Flores, A. (2010). Tratamiento de aguas subterráneas contaminadas mediante ensayos de laboratorio y experiencias piloto: Aplicación al acuífero de la Cubeta de la Llagosta (Barcelona). Boletín Geológico y Minero, 119(1), 125-136.

Neira, M. (2006). Dureza en aguas de consumo humano y uso industrial, impactos y medidas de mitigación. Estudio de caso: Chile. Memora de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Santiago de Chile.

Nordel E. (1976). Tratamiento de agua para la industria y otros usos. 5ª. Impresión. C.E.C.S.A.

- Oliva, E (2005). Remoción de carbonatos de calcio de aguas subterráneas por medio de tratamiento químico con cal y soda Ash. Universidad San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Orellana, J. (2005). Características del agua potable. Ingeniería Sanitaria, 1-7.
- Palacio.L.M.(2012).”Actualización del modelo conceptual y modelo numérico de flujo de agua subterránea en el acuífero libre de General Pico- Dorila, provincia de la Pampa, Argentina” Universidad Nacional de la Pampa.
- Pardo.J.(2015). El Agua Potable en el departamento del Meta. Revista S.O.S Sostenibilidad Ambiental, 1(1), 4.
- Parrera, S., & Alexandra, K. (2017). Efecto del carbón activado de la theobroma cacao en la adsorción de hierro del agua del río Moche, 2017.
- Pedraza, A. Y. B. (2011). Gestión del agua–una preocupación de las empresas ambientalmente responsables. Universidad & Empresa, 12(19), 87-106.
- Pimentel, E. (2008). Formulación y evaluación de proyecto de inversión. *Aspectos teóricos y prácticos*.
- Ramirez, C.A. El carbón activado para el tratamiento del agua.
- Resolución 2115 del 2007 del ministerio de la protección social ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial.
- Rigola, L (1999). Tratamiento de aguas industriales, aguas de proceso y residuales. Parámetros de calidad de las aguas. Barcelona, España: AlfaomegaMarcom-bo editores.
- Rodriguez. S & Rodríguez. R.(2010). Dureza del agua. Universidad tecnológica Nacional.
- Romero Rojas, J. A. (2006). Purificación del agua (No. 663.63 R6647p Ej. 1). Escuela Colombiana de Ingeniería,.

Romero Rojas, J.A. (1999). Calidad del Agua. Segunda Edición. Editorial Escuelas Colombiana de Ingeniería. México.

Rosell, F (2009). Historia del alcantarillado.

Retrieved from http://www.aguasdevalladolid.com/DOC/3_3_historia_alcantarillado.pdf

SAGAN- GEA. 2006. Otros Métodos de Tratamiento de Aguas Residuales. Ablandamiento del agua con carbonato bórico y cal.

Salas, D., Marzal, N., & Penedo, M. (2012). Estudio preliminar de la adsorción de níquel y cobalto utilizando carbón vegetal de conchas de coco. Tecnología Química, 32(2), 197-209.

Salinas Fernández, J. (2017). Diseño de un analizador de bajo coste para el ablandamiento de aguas.

Sámano M. 2005. Estudios de opciones eficientes de tratamientos de agua para remoción de algunos contaminantes a bajos costos considerando los impactos ambientales resultantes de los mismos. Tesis para optar a la Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería Química de la Universidad de las Américas, Puebla.

Sevilla, U. (2010). Manual del carbón activo. Obtenido de [http://www. elaguapotable.com/Manual% 20del% 20carb% C3% B3n% 20activo. pdf](http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf).

Simonis, J. J., & Basson, A. K. (2012). Manufacturing a low-cost ceramic water filter and filter system for the elimination of common pathogenic bacteria. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 50, 269-276.

Triple A. Sociedad de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Barranquilla S.A. E.S.P. (s.f).

Quiénes somos. Disponible: <http://www.aaa.com.co/conocenos/quienes-somos/>

- Valencia, Eduardo, Alfredo Aragón, Renso, & Romero, Jonathan. (2012). Potencial de reutilización del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de nátaga en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 15(1), 77-86. Retrieved January 17, 2018, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?Script=sci_arttext&pid=S0123-42262012000100009&lng=en&tlng=es
- Vélez O. M. V; Ortiz P.C & Vargas Q.M.C. (2011). Las aguas subterráneas: un enfoque práctico, Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS, Bogotá, Colombia, pgs. 51-58.
- WHO, (2006): Hardness in drinking-water. Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para la calidad del agua potable. Ginebra (Suiza), Organización Mundial de la Salud.
- World Health Organization (WHO).(2004). Guidelines for drinking-water quality. Vol 1. Recommendations, 2nd ed. Geneva.

12. Anexos

ANEXO 1: Resultados de laboratorio

Resultados de laboratorio del agua cruda #1.

PARÁMETRO	UNIDADES	A1	A2	A3	A4	A5	Promedio
	Unidades						
Turbiedad	Nefelométricas de turbidez (NTU)	0,3	0,39	0,29	0,46	0,23	0,334
Color	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	10	10	10	10	10	10
pH	Unidades de pH	6,95	7,18	7,21	7,26	7,25	7,17
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	384	408	372	384	412	392
Dureza total	mg/L CaCO ₃	400	372	412	440	400	404,8
Dureza cálcica	mg/L CaCO ₃	244	280	288	240	220	254,4
Dureza Magnésica	mg/L CaCO ₃	156	92	124	200	180	150,4
Sólidos totales	mg/L CaCO ₃	966	786	454	948	884	807,6
Sólidos disueltos	mg/L CaCO ₃	926	854	866	948	790	876,8
Conductividad	μS/cm	460,8	339,4	322,9	509	487,4	423,9
NO ₃ (mg/l)	NO ₃ mg/L	0,004	0,004	0,004	0,004	0,018	0,0068
	N mg/L	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,0016
NO ₂ (mg/l)	NO ₂ mg/L	0,013	0,007	0,013	0,013	0,01	0,0112
	N mg/L	0,004	0,002	0,004	0,004	0,003	0,0034
PO ₄ (mg/l)	PO ₄ mg/L	0,47	0,32	0,68	0,7	0,83	0,6
	P mg/L	0,16	0,11	0,22	0,23	0,27	0,198
Coliformes totales	(NMP/100ml)	<2 NMP/100ml					

Fuente. Autores.

*A1: Alícuota 1, A2: Alícuota 2, A3: Alícuota 3, A4: Alícuota 4, A5: Alícuota 5

Resultados de laboratorio del agua cruda #2.

PARÁMETRO	UNIDADES	A1	A2	A3	A4	A5	Promedio
Unidades							
Turbiedad	Nefelométricas de turbidez (NTU)	0,46	0,35	0,21	0,23	0,33	0,316
Unidades de							
Color	Platino Cobalto (UPC)	10	10	10	10	10	10
pH	Unidades de pH	7,15	7,19	7,29	7,28	7,31	7,244
Alcalinidad	mg/L CaCO₃	424	420	480	432	432	437,6
Dureza total	mg/L CaCO₃	360	388	380	360	360	369,6
Dureza cálcica	mg/L CaCO₃	236	244	212	208	212	222,4
Dureza magnésica	mg/L CaCO₃	124	144	168	152	148	147,2
Solidos totales	mg/L CaCO₃	1212	1284	1002	1216	1214	1185,6
Solidos disueltos	mg/L CaCO₃	1038	1310	1066	1032	1214	1132
Conductividad	μS/cm	485	482	486	493	496	488,4
NO₃(mg/ l)	NO₃ mg/L	-	-	-	-	-	-
N	mg/L	-	-	-	-	-	-
NO₂(mg/ l)	NO₂ mg/L	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0046
N	mg/L	4	3	4	3	9	
PO₄(mg/ l)	PO₄ mg/L	0,01		0,01			
P	mg/L	3	0,01	3	0,01	0,03	0,0152
PO₄(mg/ l)	PO₄ mg/L	6,5	11,6	13	22,3	29,4	19,075
P	mg/L	6,5	3,8	4,3	7,3	9,7	6,275
Coliformes totales	NMP/100ml	< 2 NMP/100ml					

Fuente. Autores.

*A1: Alícuota 1, A2: Alícuota 2, A3: Alícuota 3, A4: Alícuota 4, A5: Alícuota 5.

Tabla 12-3:

Resultados de laboratorio del agua cruda #3.

PARÁMETRO	UNIDADES	A1	A2	A3	A4	A5	Promedio
Unidades							
Turbiedad	Nefelométricas de turbidez (NTU)	0,35	0,26	0,23	0,22	0,27	0,266
Color	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	10	10	10	10	10	10
pH	Unidades de pH	7,17	7,25	7,25	7,28	7,26	7,242
Alcalinidad	mg/L CaCO₃	344	360	344	344	340	346,4
Dureza total	mg/L CaCO₃	396	380	392	408	408	396,8
Dureza cálcica	mg/L CaCO₃	300	320	308	320	312	312
Dureza magnésica	mg/L CaCO₃	96	60	84	88	96	84,8
Solidos totales	mg/L CaCO₃	552	718	558	1070	940	767,6
Solidos disueltos	mg/L CaCO₃	1162	946	1270	1006	1118	1100,4
Conductividad	μS/cm	1695	1691	1692	1695	1695	1693,6
NO3(mg/l)	NO3 mg/L	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
	N mg/L	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
NO2(mg/l)	NO2 mg/L	0,006	0,007	0,008	0,007	0,007	0,007

	N	mg/L	0,016	0,023	0,026	0,023	0,023	0,0222
	PO4	mg/L	0,46	0,4	0,5	0,43	0,35	0,428
PO4(mg/l)	P	mg/L	0,15	0,13	0,17	0,14	0,1	0,138
Coliformes totales	NMP/100ml							< 2 NMP/100ml

Fuente. Autores.

*A1: Alícuota 1, A2: Alícuota 2, A3: Alícuota 3, A4: Alícuota 4, A5: Alícuota 5.

ANEXO 2. Costos del proyecto

Cotos proyectados uso exclusivo servicio triple A.

Año	Mes	Consumo total(m ³)	Costo mensual	Costo Anual	Promedio costo anual
2015	Enero	2180	\$ 3.581.740,00	\$	\$ 52.335.715
	Febrero	2284	\$ 3.752.612,00	52.814.235	
	Marzo	2425	\$ 3.984.275,00		
	Abril	2477	\$ 4.069.711,00		
	Mayo	2388	\$ 3.923.484,00		
	Junio	2089	\$ 3.432.227,00		
	Julio	2264	\$ 3.719.752,00		
	Agosto	2870	\$ 4.715.410,00		
	Septiembre	3027	\$ 4.973.361,00		
	Octubre	3005	\$ 4.937.215,00		
	Noviembre	2991	\$ 4.914.213,00		
	Diciembre	4145	\$ 6.810.235,00		
2016	Enero	3989	\$ 7.224.079,00	\$	
	Febrero	4051	\$ 7.336.361,00	71.724.655	
	Marzo	3940	\$ 7.135.340,00		
	Abril	4266	\$ 7.725.726,00		
	Mayo	4408	\$ 7.982.888,00		
	Junio	3646	\$ 6.602.906,00		
	Julio	2720	\$ 4.925.920,00		
	Agosto	2644	\$ 4.788.284,00		
	Septiembre	3245	\$ 5.876.695,00		
	Octubre	2360	\$ 4.273.960,00		
	Noviembre	1874	\$ 3.393.814,00		
	Diciembre	2462	\$ 4.458.682,00		
2017	Enero	2540	\$ 5.153.660,00	\$	
	Febrero	786	\$ 1.594.794,00	46.985.553	
	Marzo	2118	\$ 4.297.422,00		
	Abril	3033	\$ 6.153.957,00		

	Mayo	2131	\$ 4.323.799,00	
	Junio	1834	\$ 3.721.186,00	
	Julio	1845	\$ 3.743.505,00	
	Agosto	1638	\$ 3.323.502,00	
	Septiembre	1949	\$ 3.954.521,00	
	Octubre	1755	\$ 3.560.895,00	
	Noviembre	1537	\$ 3.118.573,00	
	Diciembre	1991	\$ 4.039.739,00	
2018	Enero	1478	\$ 3.093.454,00	\$
	Febrero	1266	\$ 2.649.738,00	37.818.417
	Marzo	1872	\$ 3.918.096,00	
	Abril	1992	\$ 4.169.256,00	
	Mayo	1639	\$ 3.430.427,00	
	Junio	1992	\$ 4.169.256,00	
	Julio	1836	\$ 3.842.748,00	
	Agosto	1694	\$ 3.545.542,00	
	Septiembre	727	\$ 1.521.611,00	
	Octubre	1506	\$ 3.152.058,00	
	Noviembre	694	\$ 1.452.542,00	
	Diciembre	1373	\$ 2.873.689,00	

Fuente: Autores.